



# Il sistema costiero marchigiano nel contesto dei cambiamenti climatici

Maurizio Brocchini  
Università Politecnica delle Marche

# Sommario

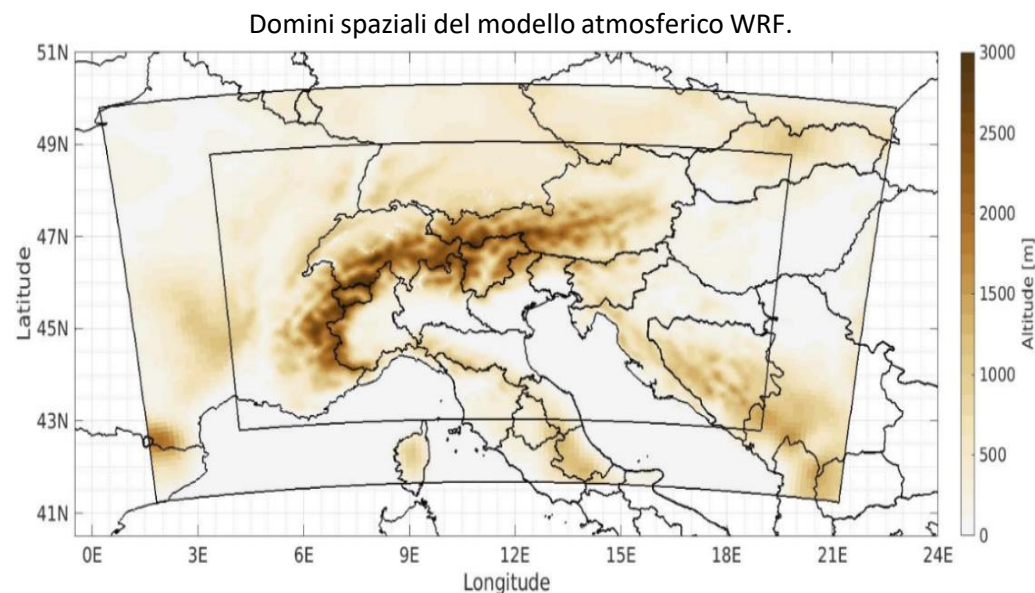
- Il quadro climatico
- Il sistema costiero – ADRIACLIM
- Il sistema costiero – CASCADE
- Conclusioni



## Il Quadro Climatico

# La crisi climatica

- La temperatura globale è già aumentata di 1.1 °C dal periodo 1850-1900 (IPCC AR6, 2021)
- Se le **temperature** globali **aumenteranno più di 2 °C rispetto al 1850**, c'è un alto rischio di un **cambiamento accelerato del clima non più reversibile** con impatti rilevanti su ecosistemi e attività umane.



# Dati

## QUADRO CLIMATICO ATTUALE

- EOBS – dataset grigliato Europeo di dati osservativi (versione 24.0e)
- Temperature e precipitazioni giornaliere (1950-presente)
- Risoluzione spaziale  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$

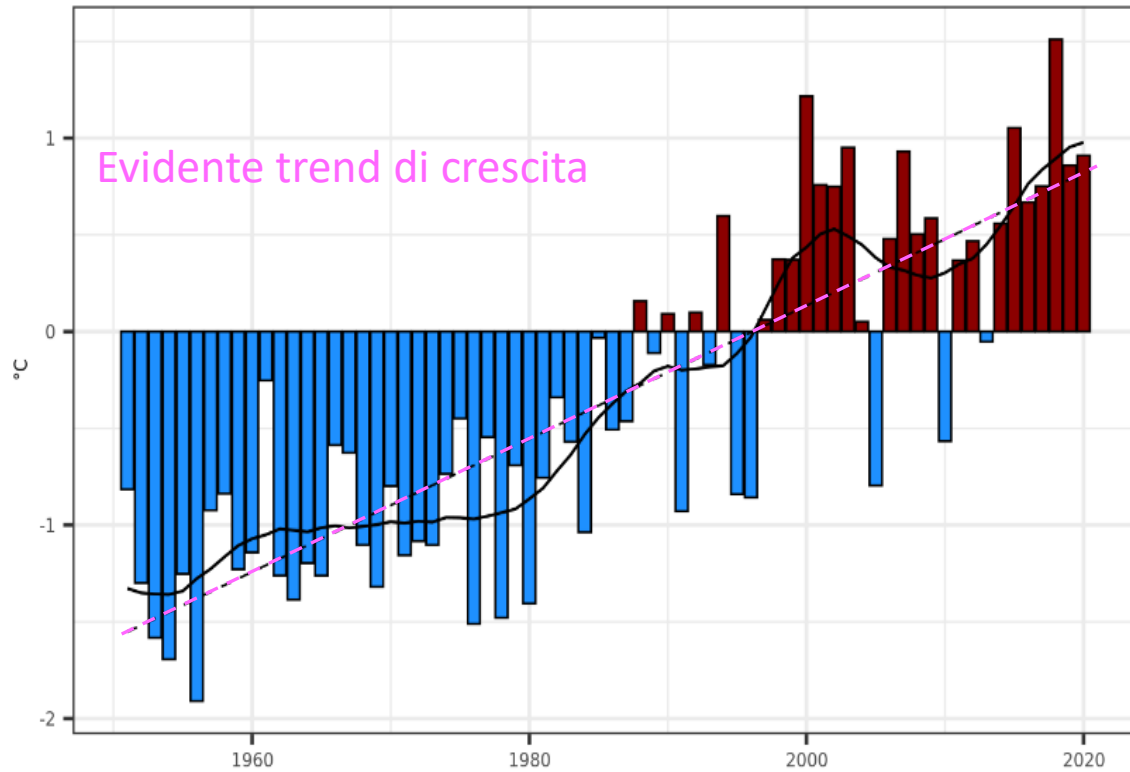
## QUADRO CLIMATICO FUTURO

- Simulazioni climatiche con il modello atmosferico di mesoscala WRF su due domini innestati (12 km e 4 km) i quali usano come condizioni iniziali e al contorno gli output del modello di circolazione generale EC-Earth (25km)
- Due periodi: storico (1979-2008) e futuro (2039-2068)
- Scenario RCP 8.5
- Output orario

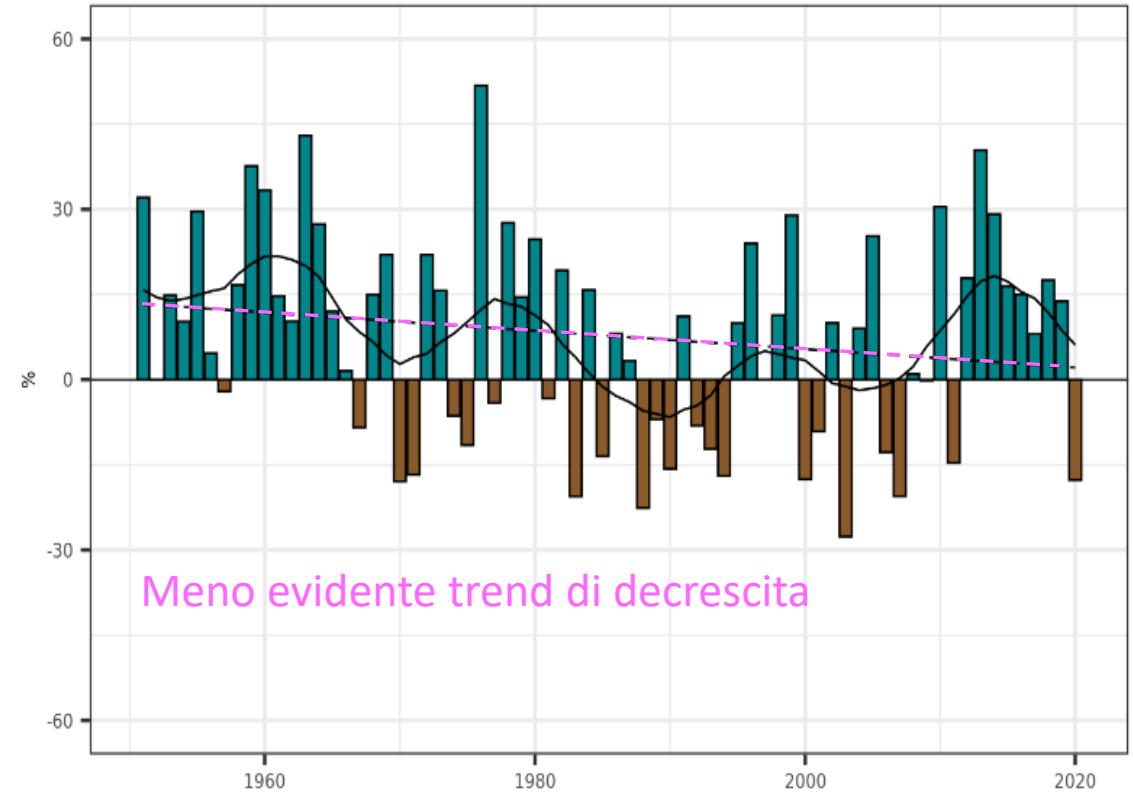


# Variazioni recenti (EOBS)

Temperatura media annuale



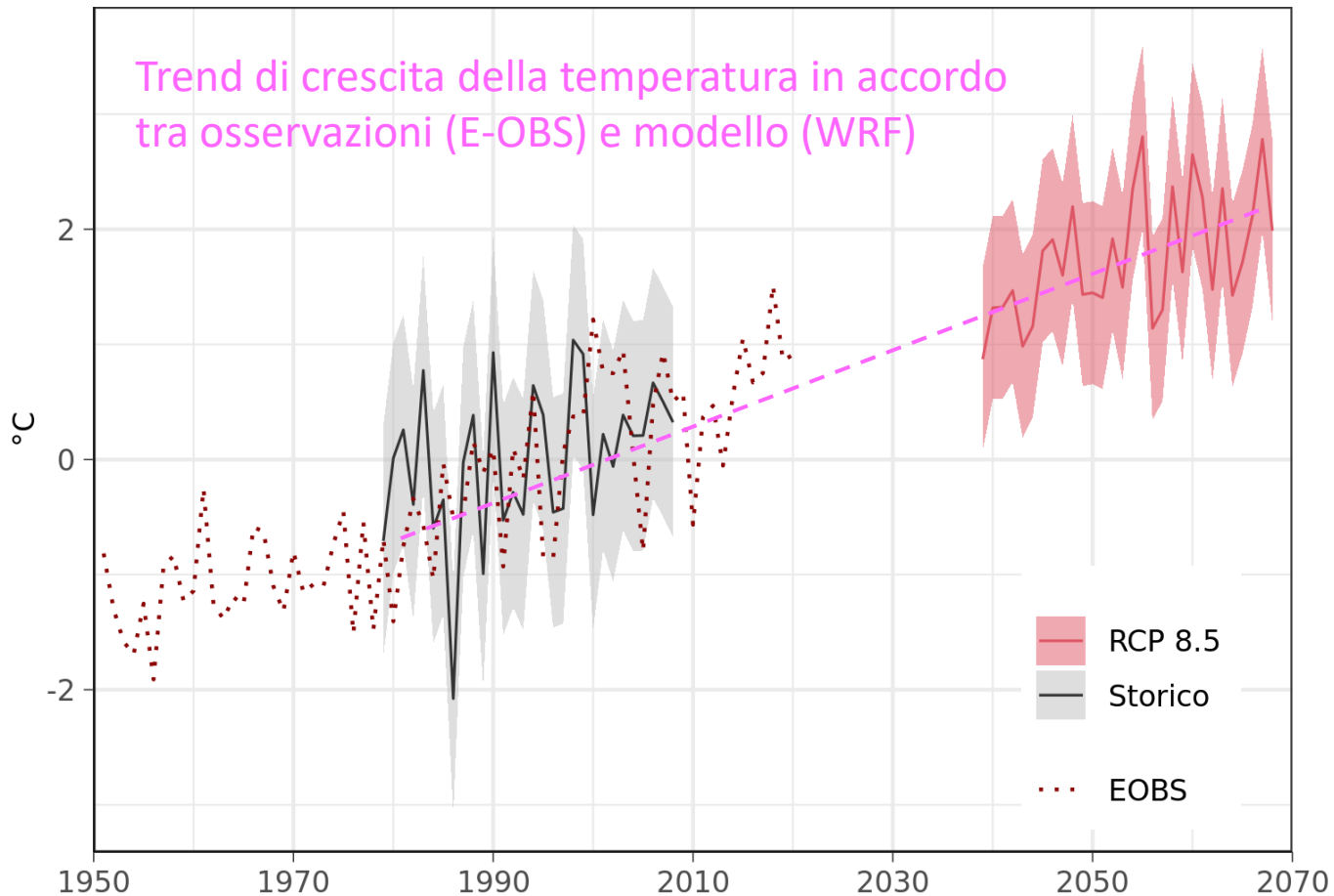
Precipitazione annuale



ANOMALIE ANNUALI RISPETTO AL 1981 – 2010

# Scenario climatico futuro (WRF)

Anomalie di temperatura media annuale



- $\sim +0.3$  °C al decennio nelle simulazioni WRF
- Trend simile per osservazioni e scenario
- **+ 1.8 °C** rispetto al passato **entro il 2070**



## Il sistema costiero - ADRIACLIM

# Il sistema costiero

Settore strategico per lo sviluppo del territorio, anche perché strettamente interconnesso ad altri settori, quali ad esempio risorse idriche, ecosistemi, turismo, trasporti, pesca e itticultura.

## Il sistema costiero nello sviluppo strategico del territorio



## Problematiche che interessano il sistema costiero

Erosione costiera



Innalzamento livello medio mare

Aumento fenomeni meteorologici estremi



# Impatti del cambiamento climatico sul sistema costiero

## Indicatori quali-quantitativi

### INDICATORI FISICI:

- sono i meno complessi da stimare e, quindi, i più affidabili;
- costituiscono il forzante di molti altri indicatori;
- valutati per un periodo di riferimento (1976-2005) e per uno scenario futuro RCP8.5 (2041-2070);
- utilizzati due valori di riferimento, il 90° percentile e il valore associato ad un tempo di ritorno centennale.

#### 90° percentile:

Data una distribuzione di dati, è il valore che viene superato il 10% delle volte.

#### Tr=100 anni:

Indica un evento che ha una probabilità dell'1% (1/100) di verificarsi in un dato anno (riferimento per progettazione ingegneristica).

### INDICATORI BIO-ECOLOGICI:

- mappatura dello stato attuale;
- proiezioni disponibili solo per alcuni indicatori;
- analisi dei trend passati.

### INDICATORI SOCIO-ECONOMICI:

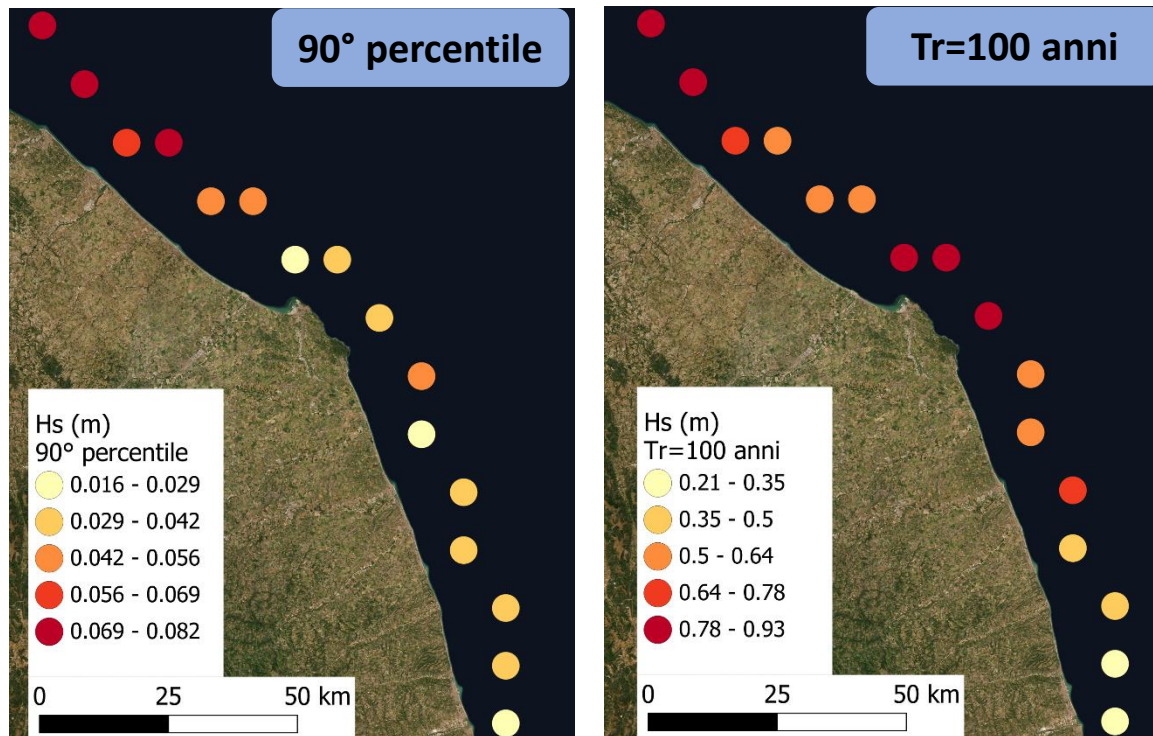
- sono i più complessi da proiettare al futuro perché, oltre a dipendere da variabili deterministiche, richiedono una capacità di previsione delle scelte socio-politiche forzate dai cambiamenti climatici;
- proiezioni disponibili solo per la densità di popolazione;
- analisi dei trend passati.



# Storminess

## Dati dal Copernicus Climate Change Service (C3S)

Facendo riferimento al modello HIRAM5 (Christensen, 1998), uno dei più cautelativi per la previsione dei campi di vento futuri, la forzante ondosa al 2070 risulta in **leggero aumento** rispetto a quella di riferimento.



Differenza tra scenario futuro e scenario attuale per altezza d'onda significativa.

- Le massime altezze d'onda, alla profondità di 20 m, raggiunte nello scenario **futuro** sono di:
  - 2.9 m per 90° percentile
  - 7.75 m per Tr=100 anni
- Si osserva un **aumento** medio dell'altezza d'onda nello scenario futuro di:
  - 4.5 cm per 90° percentile
  - 50 cm per Tr=100 anni

# Sopraelevazione estrema della superficie del mare ( $\eta_{\max}$ )

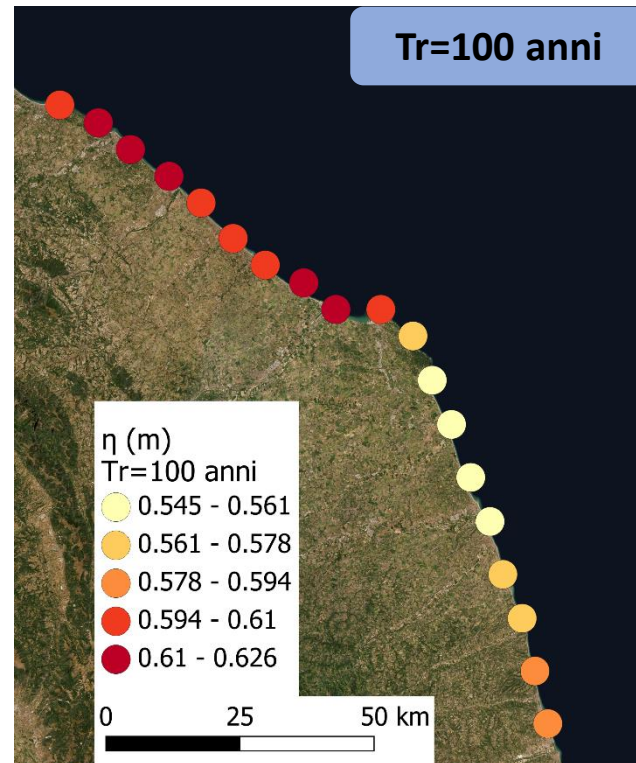
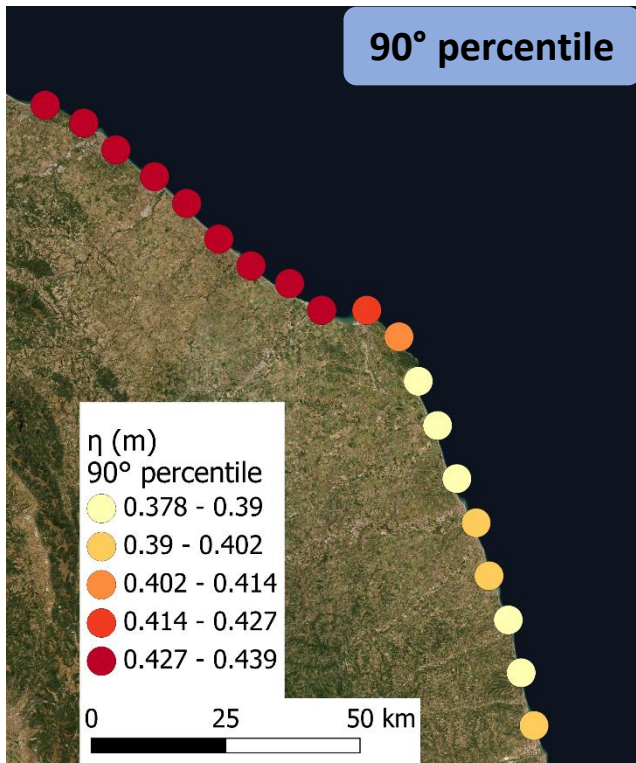
$$\eta_{\max} = \eta_{\text{SLR}} + \eta_{\text{M}} + \eta_{\text{SS}} + \eta_{\text{RU}}$$

**Sea Level Rise**  
(*Sea Level  
Projection Tool*)  
+ 36 cm

**Marea (C3S)**  
Max = 37 cm  
 $\pm 1$  cm in base  
alle zone

**Storm surge (C3S)**  
Max (90° prct) = 16 cm  
Max (Tr100) = 1 m  
+ 1 cm (90° prct)  
+ 14 cm (Tr100)

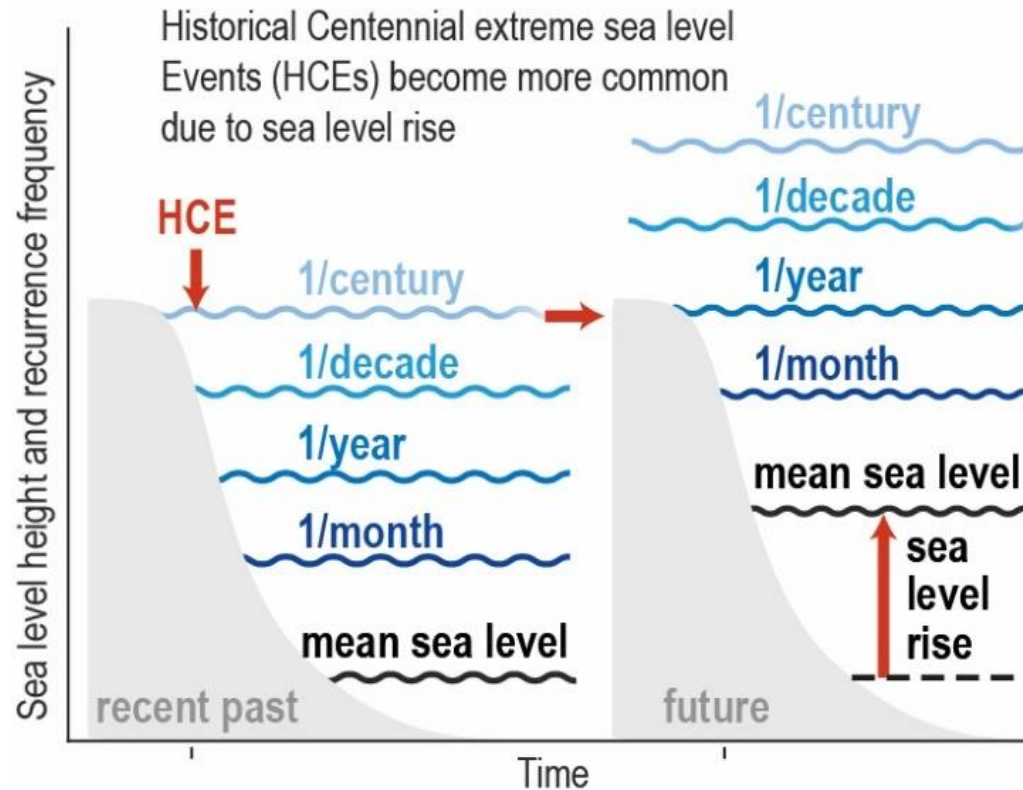
**Run-up (C3S+Stockdon,  
2006)**  
Max (90° prct) = 1 m  
Max (Tr100) = 3 m  
+ 4 cm (90° prct)  
+ 10 cm (Tr100)



- Mediamente, la sopraelevazione estrema della superficie del mare nello scenario **futuro** risulta pari a:
  - **1.76 m** per 90° percentile
  - **3.97 m** per Tr=100 anni
- Si osserva un **aumento** medio della sopraelevazione di circa:
  - **40 cm** per 90° percentile
  - **60 cm** per Tr=100 anni

Differenza tra scenario futuro e scenario attuale per sopraelevazione estrema.

# Aumento della frequenza di accadimento di eventi estremi



L'innalzamento del livello del mare ha ripercussioni anche sulla **frequenza di accadimento** di eventi marini estremi. L'IPCC sostiene che livelli del mare estremi, che storicamente (1986 – 2005) si verificavano una volta in 100 anni, sono previsti diventare eventi con tempo di ritorno annuale entro il 2100 per molte località costiere del globo.

[\*\(IPCC - Summary for Policymakers - Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate\)\*](#)

# Estensione della spiaggia emersa – due modelli

La penetrazione a costa del mare, che determina l'estensione della spiaggia emersa, è stata valutata utilizzando **due tipologie di modelli radicalmente diversi**:

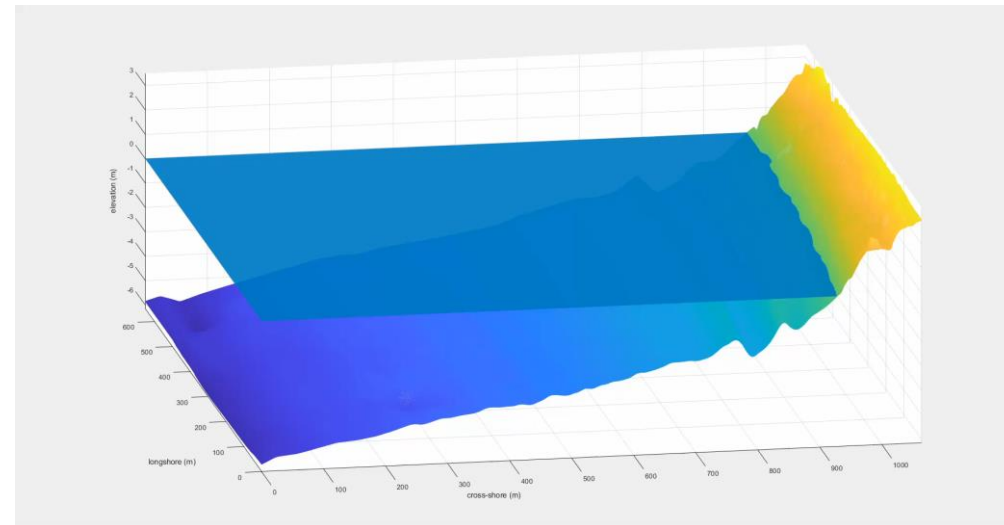
1. Alla prima classe appartiene il modello a «**bathtub**» (vasca da bagno) e comporta la semplice **intersezione del piano orizzontale** di sopraelevazione estrema della superficie del mare  $\eta_{\max}$  con la **topografia della costa**.

Fornisce sovrastima del massimo allagamento possibile per aree estese e a costi di calcolo ridotti.



2. Alla seconda classe appartengono i **modelli di circolazione costiera**, che calcolano l'evoluzione del moto ondoso e delle correnti in **maniera dinamica**.

Forniscono una stima accurata dell'allagamento in condizioni estreme per aree limitate a costi di calcolo elevati.



# Estensione della spiaggia emersa – Conseguenze del SLR

In condizioni di **mare calmo**, a seguito del solo innalzamento del livello medio mare (circa 36 cm al 2070), si prevedono i seguenti valori di **perdita di spiaggia emersa**:

- PESARO: 9 m
- SENIGALLIA: 25 m
- CIVITANOVA MARCHE: 12 m
- SAN BENEDETTO DEL TRONTO: 30 m





# Estensione della spiaggia emersa - Analisi numerica di dettaglio

Analisi di dettaglio su due siti test, Senigallia e Pesaro, eseguita con due diversi modelli numerici al fine di verificare i risultati ottenuti.

## DELFT3D

- Modello *wave-averaged* (mediato sul periodo ondoso)
- Accoppiamento moduli FLOW e WAVE
- Il modulo FLOW calcola il flusso non stazionario e il trasporto di sedimenti forzati da marea e fenomeni meteorologici
- Il modulo WAVE calcola la propagazione di onde, la generazione di onde da vento e le interazioni non lineari tra onde. Utilizza il wave driver SWAN per generare il campo d'onde forzante la circolazione
- L'accoppiamento permette l'interazione dinamica tra i due moduli, considerando l'effetto delle correnti calcolate dal FLOW sul moto ondoso del WAVE e viceversa
- Tempi di calcolo contenuti

## FUNWAVE-TVD

- Modello *wave-resolving* (risolve e modella la propagazione di ogni singolo fronte ondoso dal punto di generazione fino alla zona di battigia)
- Risolve le equazioni differenziali di Boussinesq, adatte alla modellazione della propagazione di onde medio-lunghe in acque intermedie
- Modello per le acque basse per la risoluzione di processi che avvengono in acque basse
- Tempi di calcolo più lunghi

# Estensione della spiaggia emersa - Analisi numerica di dettaglio

## ANALISI NUMERICA

- Condizioni di **tempesta**, con tempo di ritorno 100 anni al 2070
- Storm surge e SLR imposti come sopraelevazione iniziale della superficie del mare
- Propagazione ondosa, inclusi run-up e set-up, calcolati dai modelli
- Picco di marea concomitante al picco della tempesta

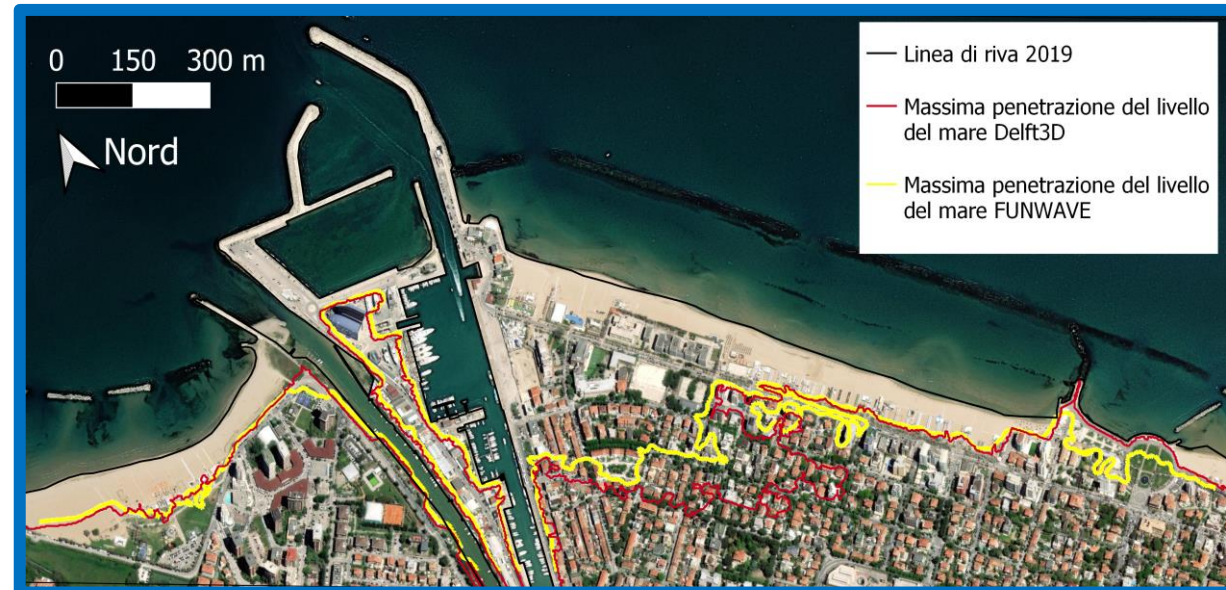
## RISULTATI

- Allagamenti meno gravosi rispetto a quelli forniti dal metodo speditivo poiché le simulazioni tengono conto di processi di dissipazione ondosa (es. frangimento) non considerati nel metodo speditivo
- **Perdita della spiaggia** e delle strutture localizzate su di essa. Per Pesaro, l'inondazione interessa anche una parte del **centro abitato**

## SENIGALLIA



## PESARO





## Il sistema costiero - CASCADE

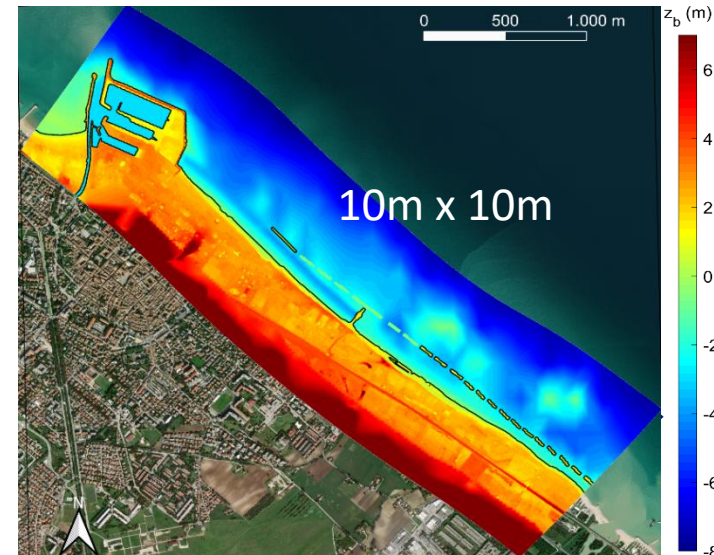
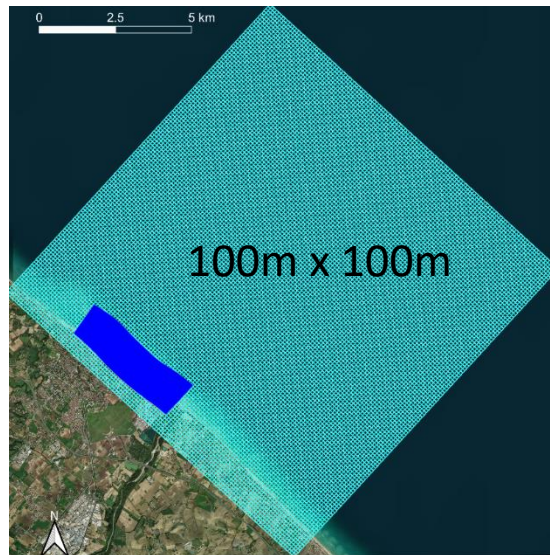
# Finalità e metodologia

- Scopo primario di CASCADE era **la revisione dei perimetri di inondazione costiera attualmente vigenti** in virtù del “Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere” (PGIZC);
- La metodologia è basata **sull’uso di modelli di circolazione costiera** e lo studio si è focalizzato su **5 siti test**. Da Nord a Sud: Pesaro, Fano, Montemarciano, Fermo e S. Benedetto del Tronto;
- Lo scenario emissivo è sempre RCP8.5;
- Le forzanti sono state calcolate con riferimento a 3 periodi di ritorno  $Tr=20$ anni, 100anni e 200anni.



# Finalità e metodologia

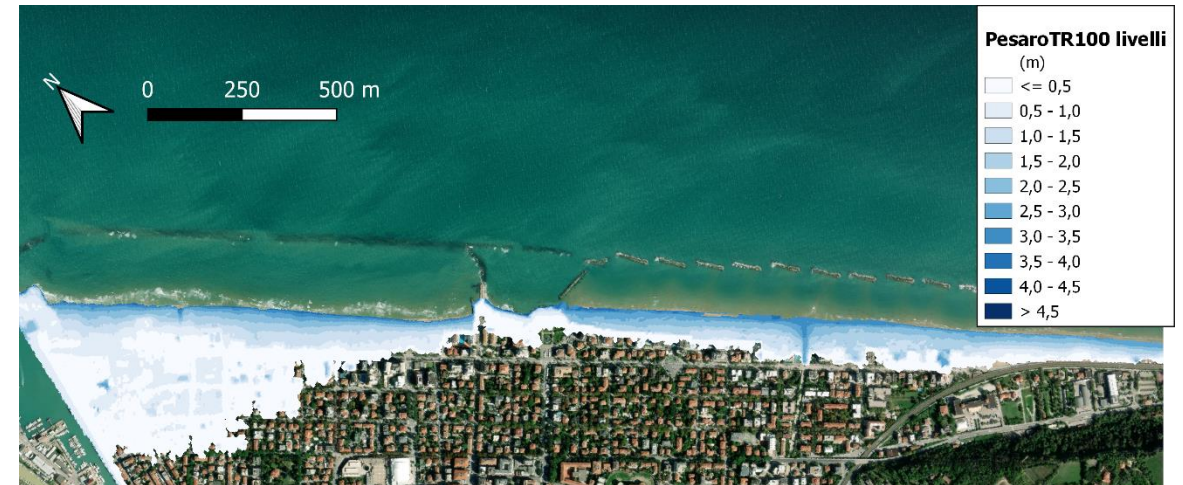
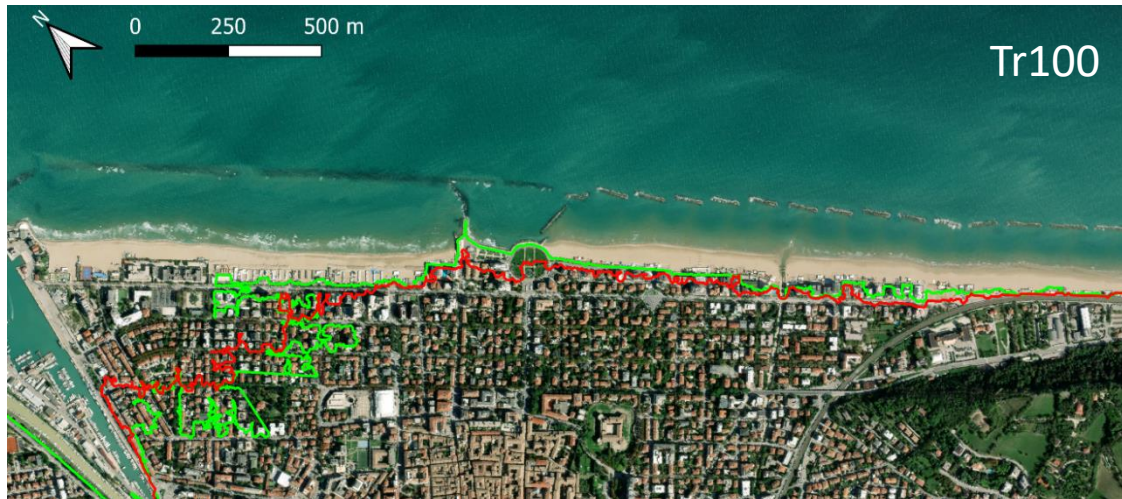
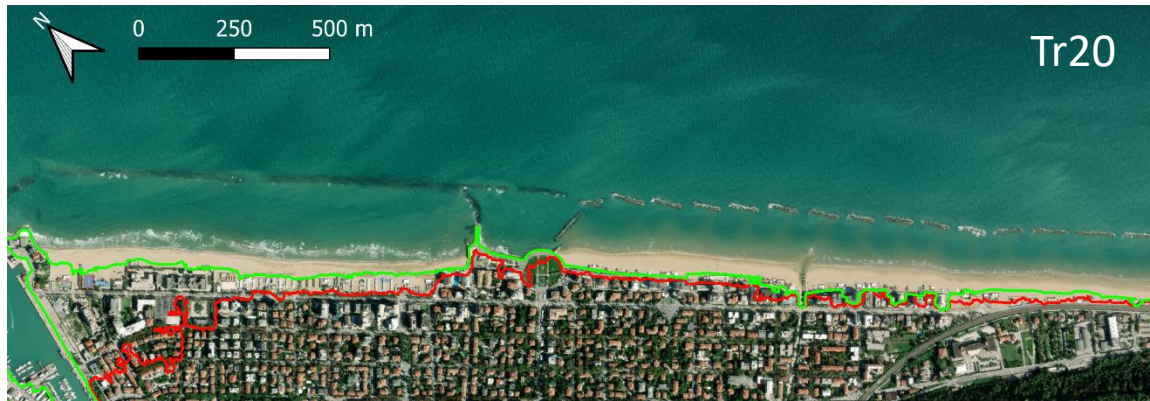
- Come per Adriacim, si sono utilizzati **due modelli di circolazione costiera**;
- In questo caso il modello **Delft3D** è stato utilizzato **per trasferire il campo di moto ondoso dal largo** (profondità di circa 20m) alla zona sotto costa e, quindi, si è utilizzato il modello **XBeach** per **calcolare l'allagamento** (es. griglia del sito di Fano);



- Come FUNWAVE, XBeach è un **modello di circolazione che risolve l'onda** con discretizzazione inferiore al periodo. Ha ottime caratteristiche di descrizione del flusso in prossimità di opere di protezione costiera ed è **molto flessibile ed efficiente per simulazioni onerose**.



# Risultati - Pesaro

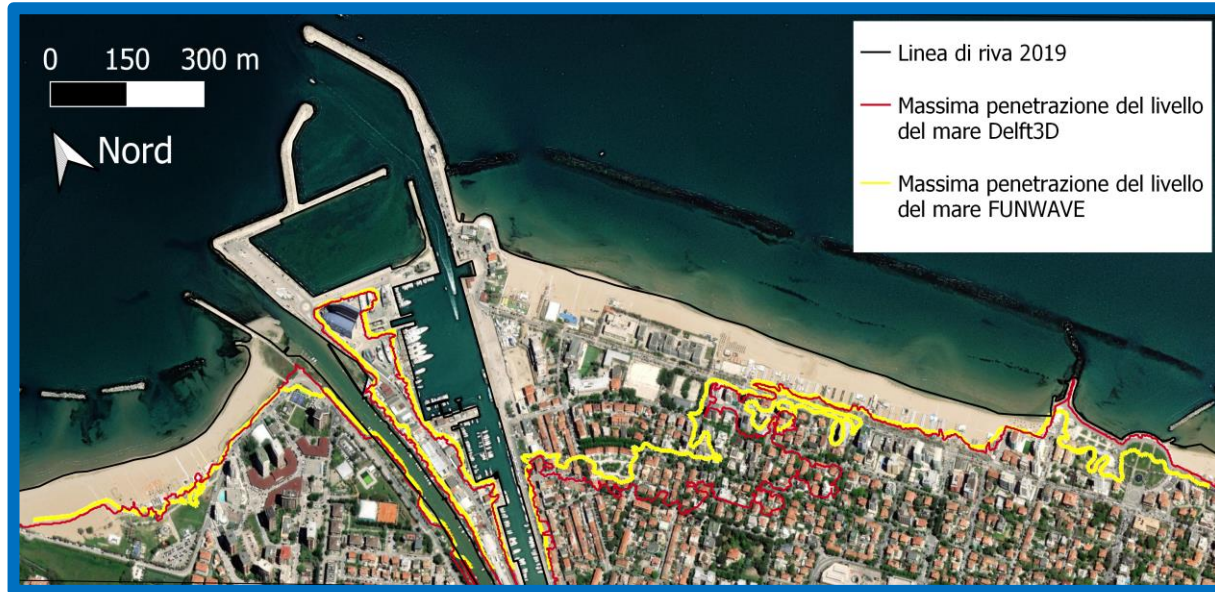


Linea verde=perimetro inondazione PGIZC  
(Tr200= estrapolazione da osservazioni)

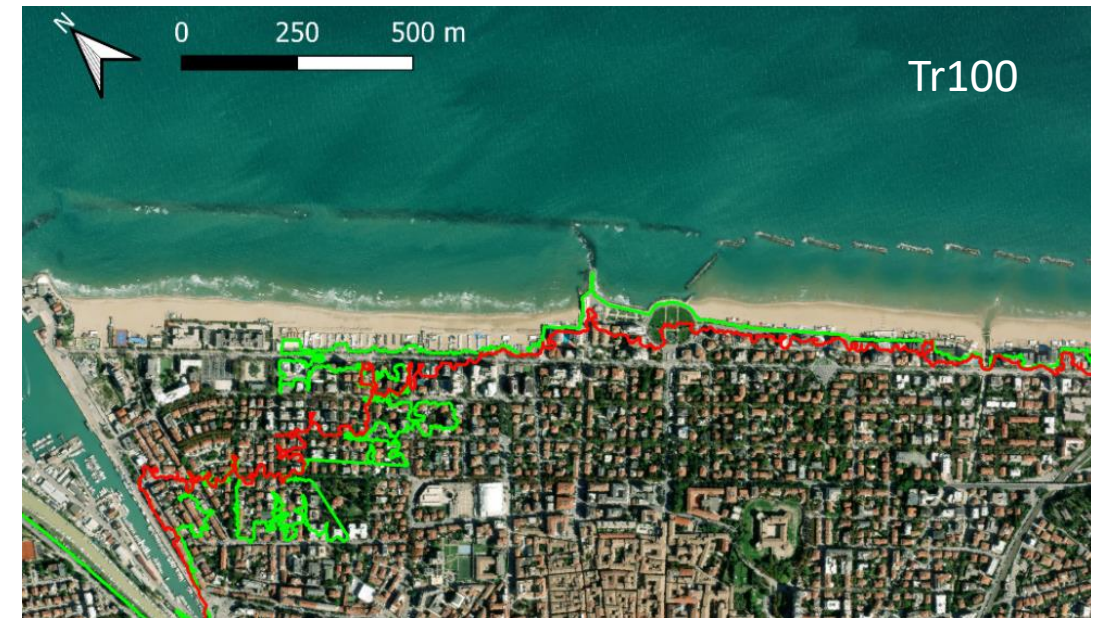
Linea rossa=simulazione Xbeach



# Risultati – ADRIACLIM vs CASCADE - Pesaro



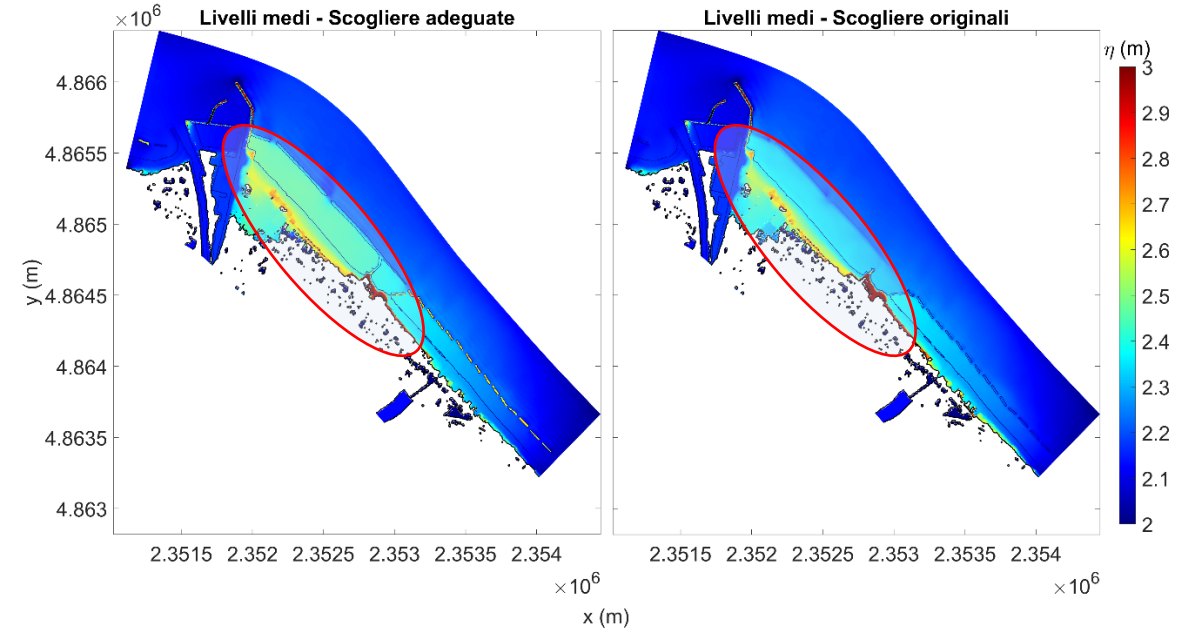
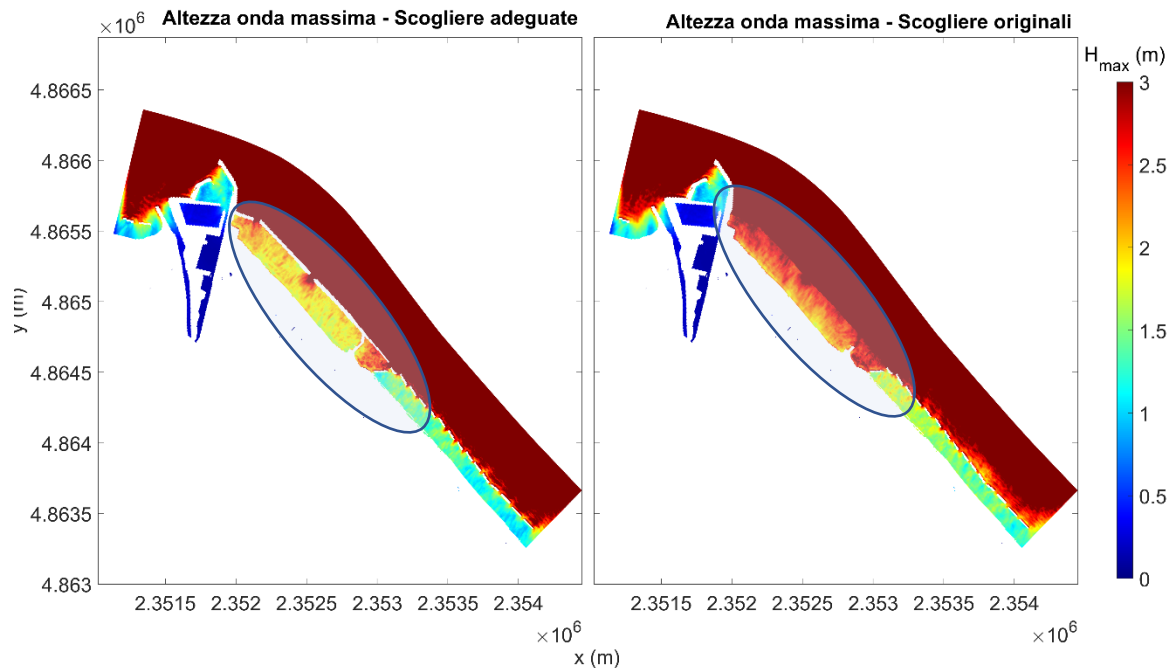
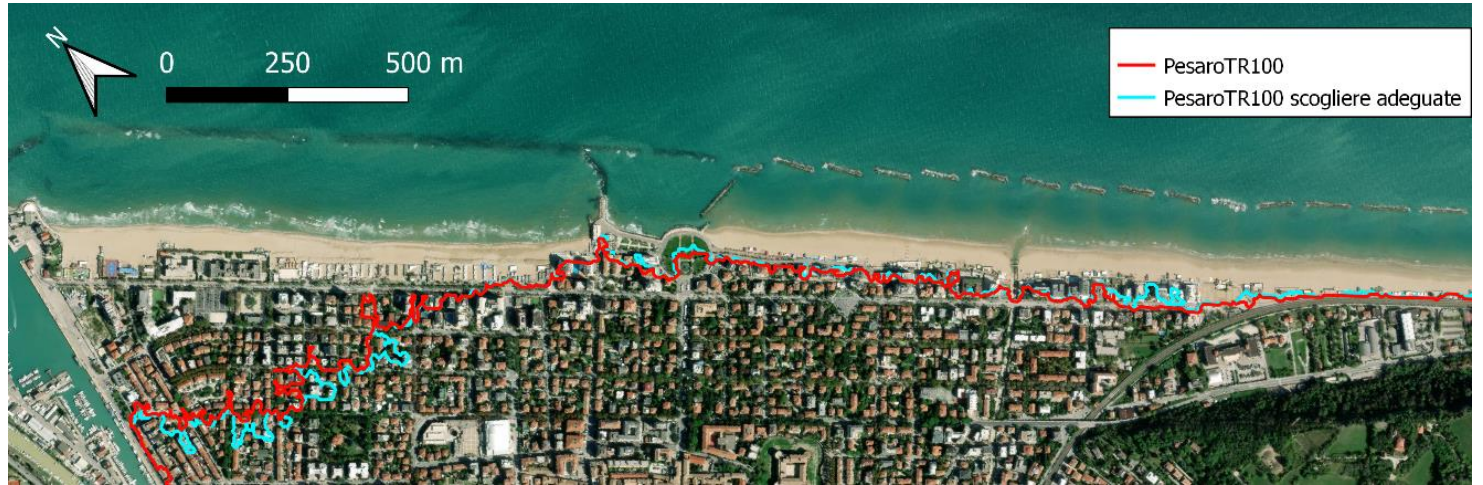
Le simulazioni effettuate nell'ambito dei due progetti hanno prodotto aree allagabili molto simili.



Linea verde=perimetro inondazione PGIZC  
Linea rossa=simulazione XBeach

# Risultati - Pesaro

- L'adeguamento delle scogliere sommerse tramite innalzamento della cresta proporzionale a SLR + storm surge **non raggiunge lo scopo voluto** perché l'abbattimento dell'onda (sinistra) è bilanciato dall'aumento del setup (destra).







# Conclusioni

Aumento delle temperature (+1,8 °C al 2070)

Generale riduzione delle precipitazioni, ma aumento dei fenomeni intensi

Sistema costiero altamente impattato dal cambiamento climatico:

- Aumento delle aree soggette a inondazione marina
- Riduzione della spiaggia, con effetti negativi sul turismo
- Riduzione acque potabili per infiltrazione salina
- Infrastrutture maggiormente esposte a rischio inondazione
- Esposizione in crescita della popolazione, che tende a concentrarsi nella fascia costiera
- Perimetrazioni aree allagabili del PGIZC parzialmente confermate da analisi di dettaglio
- Necessità di analizzare modalità di adeguamento delle opere di difesa





# Le alluvioni del Misa nel contesto dei cambiamenti climatici: mitigazione e adattamento

Maurizio Brocchini  
Università Politecnica delle Marche

# Sommario

- L'evento
- Senigallia città estuarina
- Mitigare da monte o valle?
  - Attività in corso



# L'evento

# Sinossi



Il 15-16 settembre 2022, il bacino del fiume Misa-Nevola è stato colpito da forti piogge indotte da un sistema temporalesco proveniente da ovest.

La conseguenza è stata un'estesa alluvione che ha causato 13 vittime e danni stimati nell'ordine di due miliardi di euro.

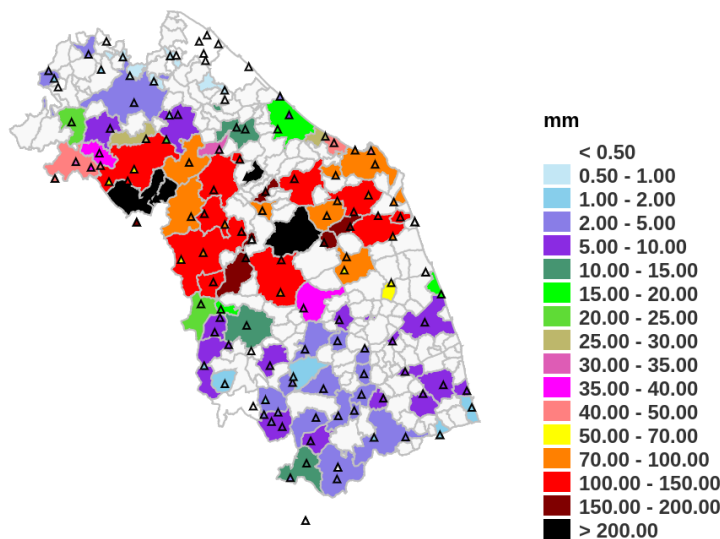
Il 16 settembre 2022, il Consiglio dei Ministri ha dichiarato lo stato di emergenza e il capo del Dipartimento Nazionale di Protezione Civile ha nominato il Presidente della Regione come Commissario delegato all'emergenza.

L'unità del Commissario ha richiesto il parere di vari organismi per i lavori di massima urgenza e mitigazione.

**UNIVPM ha avuto il compito di studiare i lavori di mitigazione del rischio di alluvioni con particolare attenzione alla città di Senigallia.**



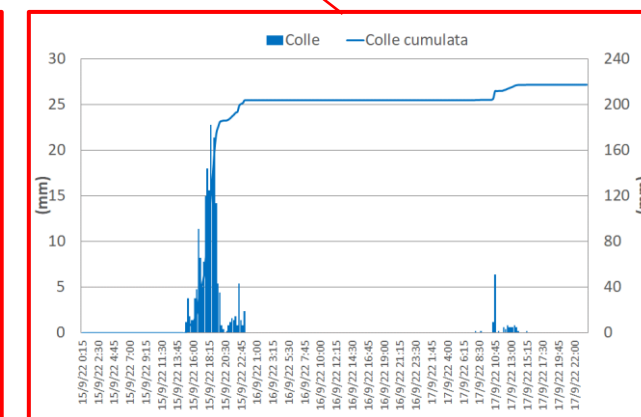
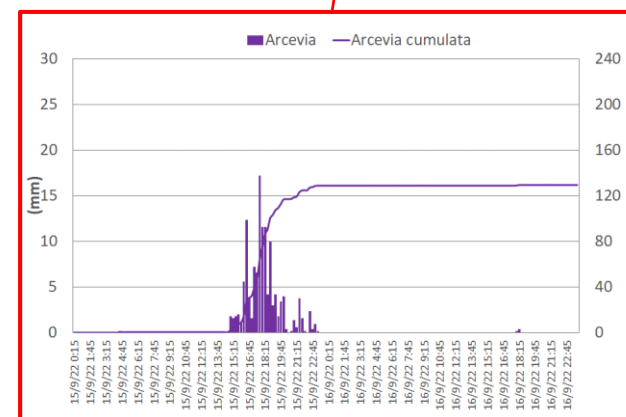
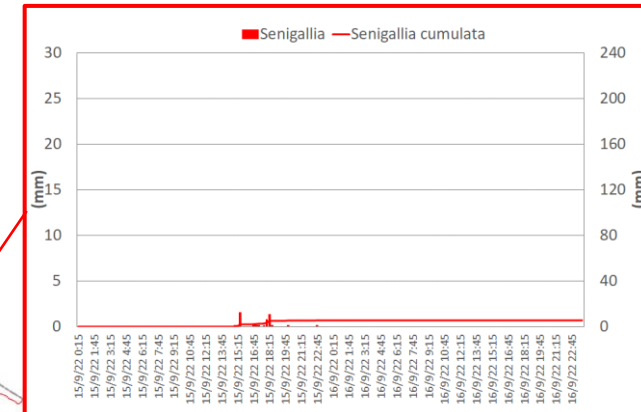
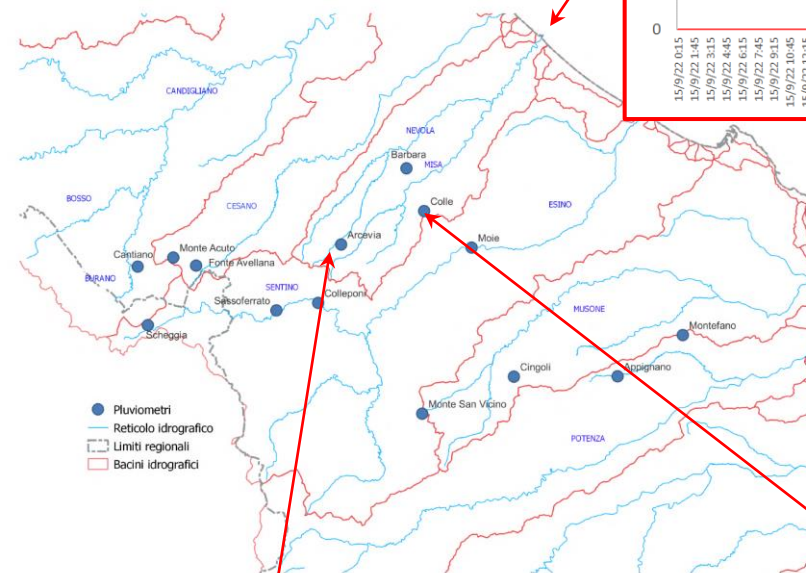
Precipitazione cumulata da 2022-09-15T15:00:00 a 2022-09-16T00:00:00



Precipitazione cumulata (mm) del 15/09/2022.

Fonte: Protezione Civile Regionale.

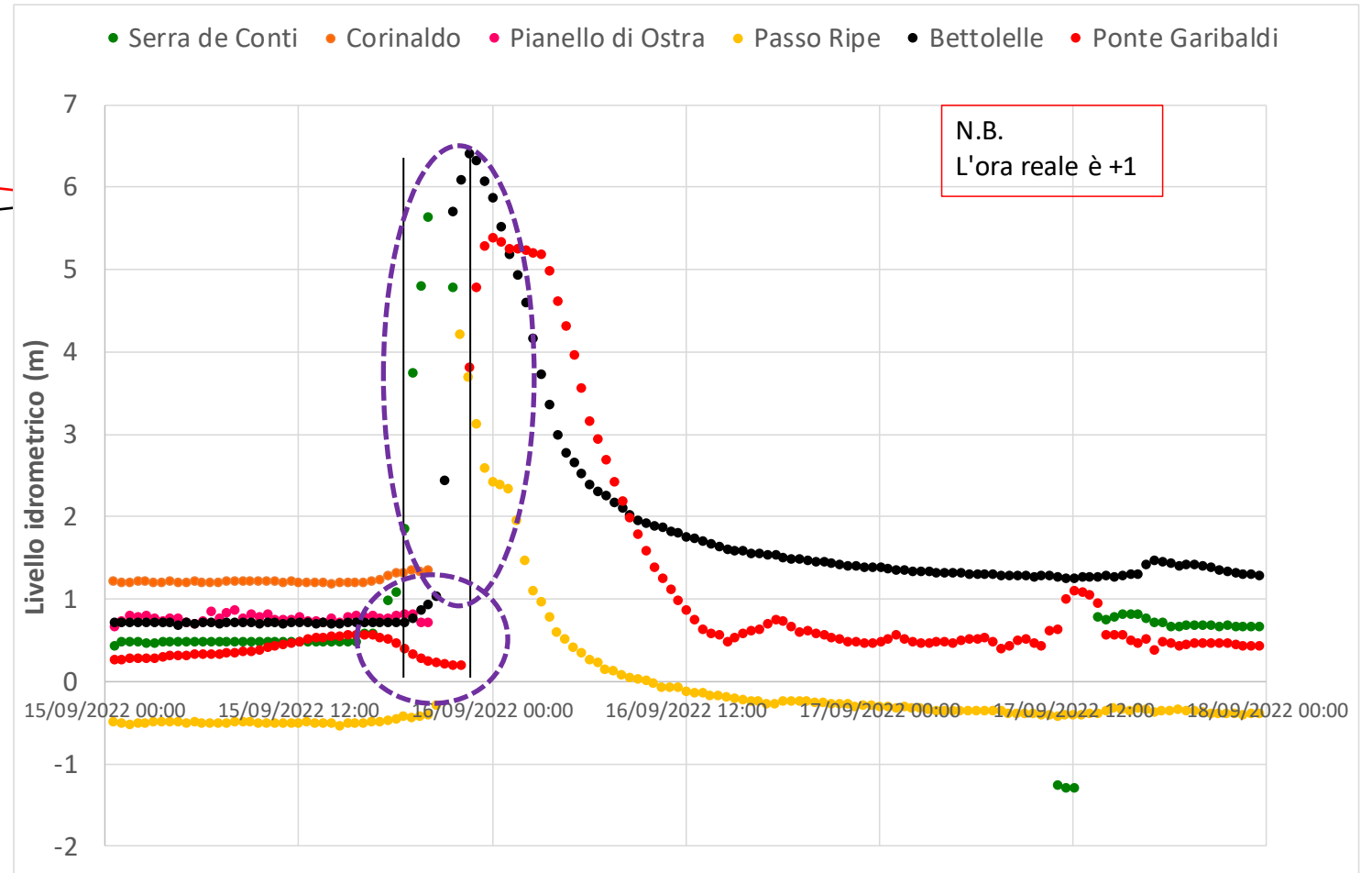
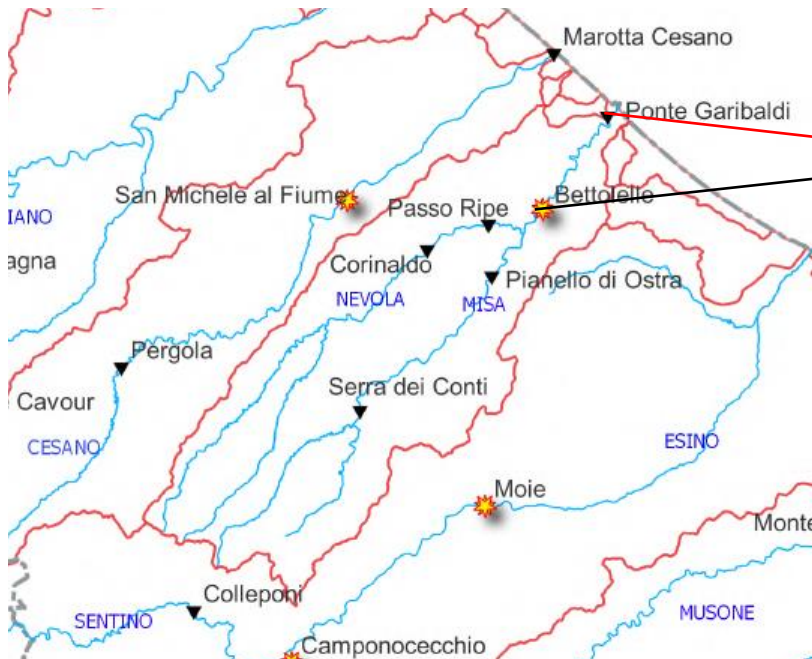
# Le piogge



- Il sistema temporalesco ha indotto **precipitazioni cumulate di centinaia di mm nell'area montuosa** (420mm in 48 ore a Cantiano), ma quasi **nessuna precipitazione a valle**;
- **L'eccezionalità delle piogge cumulate** è stata stimata con TR>1000 anni ed anche con Severità Relativa di 7.9 (massima di altri eventi italiani 5.3);
- I **modelli di previsione non sono riusciti a descrivere l'evento** perché non sono riusciti a rappresentare il **trigger: fulmini non descritti**.



# I livelli idrici



I livelli idrometrici nel letto del fiume hanno evidenziato:

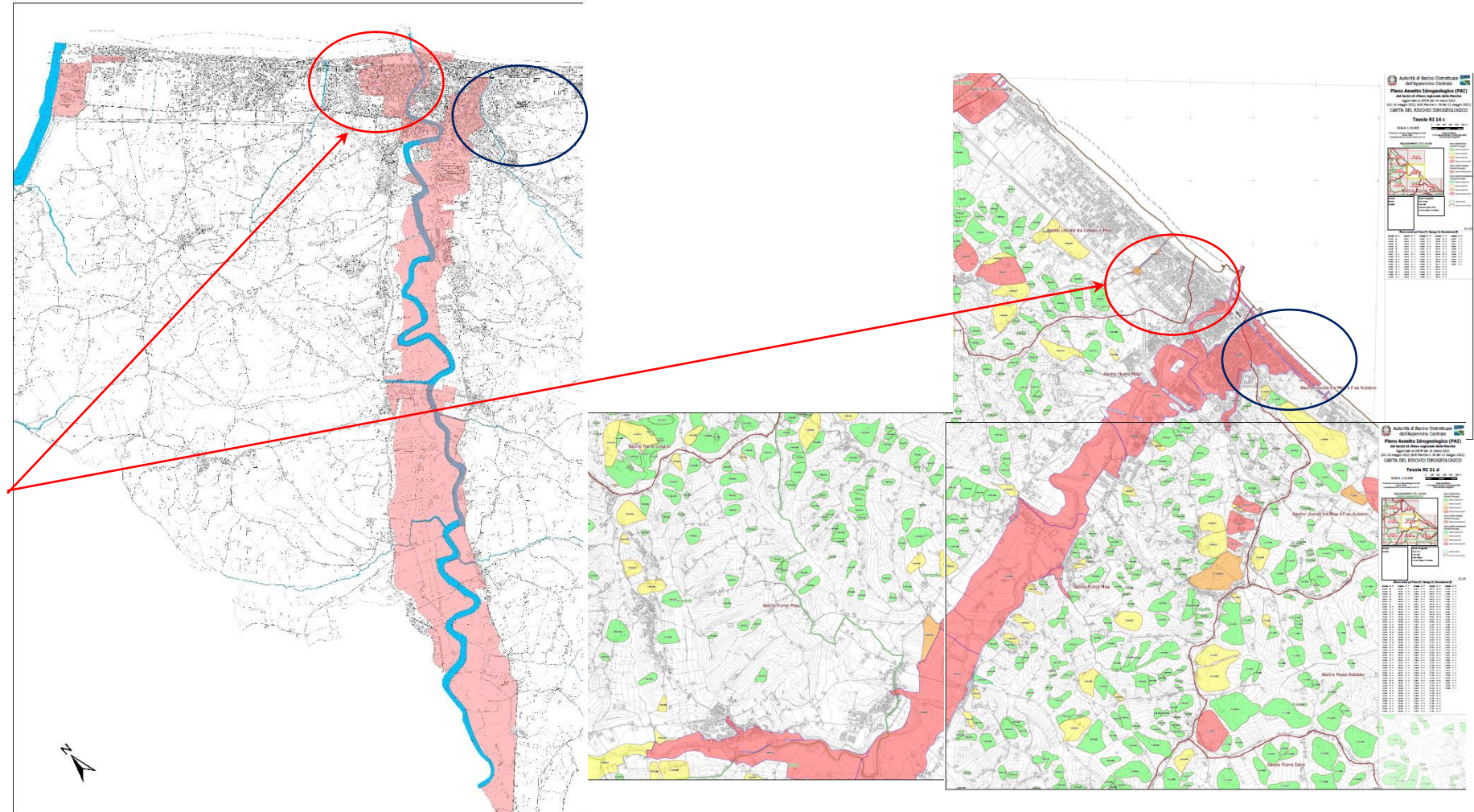
- una **rapida transizione dal livello di magra al picco di piena** (in circa 4 ore);
- la fortunata **coincidenza del picco di piena** in città con una fase di **marea in calo**.

# Le aree allagate

AREA ROSSA – Comune di Senigallia

PAI marzo 2022 – Regione Marche

- L'impronta dell'**alluvione** sul terreno evidenzia alcune  **differenze con le aree del "Piano di Assetto Idrogeologico – PAI"**, in particolare a Senigallia;
- L'inaspettato allagamento sulla sinistra idraulica è stato causato principalmente dall'**insufficienza delle sezioni transitabili dei ponti cittadini**;
- A **monte** della città, le inondazioni si sono verificate principalmente sulla **sinistra idraulica**.



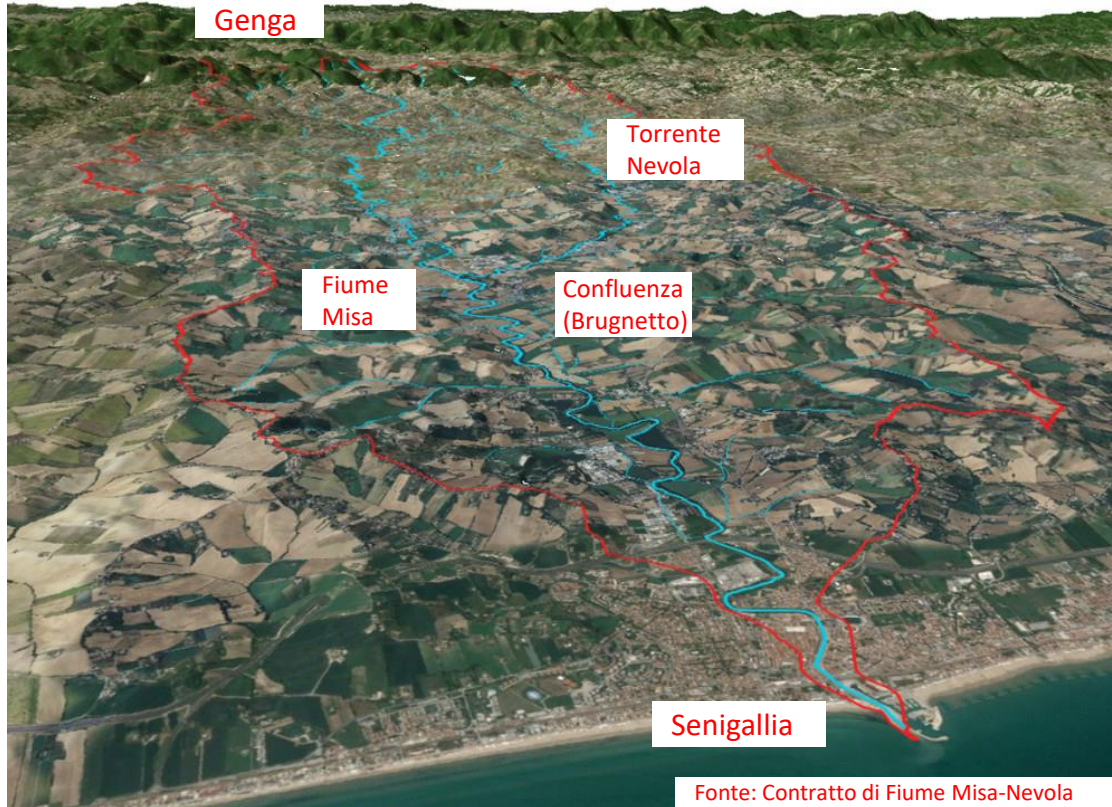




# Senigallia città estuarina



# Senigallia: insediamento alla foce del Misa



Il fiume Misa nasce a San Donnino (Genga) e si sviluppa in un bacino di circa 383 km<sup>2</sup>.

Come quasi tutti i corsi d'acqua che sfociano nell'Adriatico, ha un **carattere torrentizio**, alternando lunghi periodi di **basso flusso a intensi eventi di piena** (tempo di concentrazione di 8-10 ore).

L'ambiente della **foce è micromareale** (escursione di 0.5 m).



La città di Senigallia è cresciuta nel corso dei secoli alla foce del fiume Misa, **estendendosi parallela alla costa**.

La progressiva urbanizzazione della città ha portato **alla progressiva riduzione delle aree golenali e alla chiusura dell'unico sfioratore («cavo Penna»)**.

Il fiume ha una **sezione decrescente verso la foce**: da circa 60 m a monte della città fino a 20-25 m alla foce.



# Senigallia: alluvioni da forzanti composti



1940, l'argine del Misa è demolito dalla piena in via XX Settembre



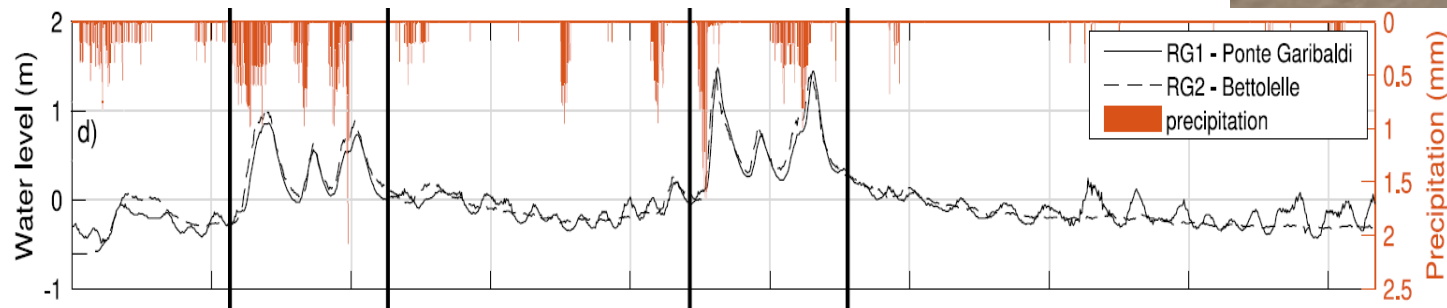
1976, esondazione in via XX Settembre

- Il fiume Misa ha una **lunga storia di devastanti alluvioni**, la maggior parte delle quali avvenute in **concomitanza con tempeste in mare** (1611, 1765, 1884, 1896, 1897, **1940**, 1976);
- I principali lavori di mitigazione effettuati in città sono stati: a) rinforzi degli argini e b) **dragaggio continuo** volto a contrastare il **massiccio trasporto di sedimenti**: trasporto in sospensione di circa un **milione di tonnellate all'anno**;
- A monte della città, **alcune aree sono state periodicamente colpite da alluvioni** dovute a tracimazioni e/o rotture di argine (argini costruiti circa un secolo fa).



# Interazioni fiume-mare alla foce: onde e marea

- La corrente del fiume interagisce con le onde che propagano verso monte.



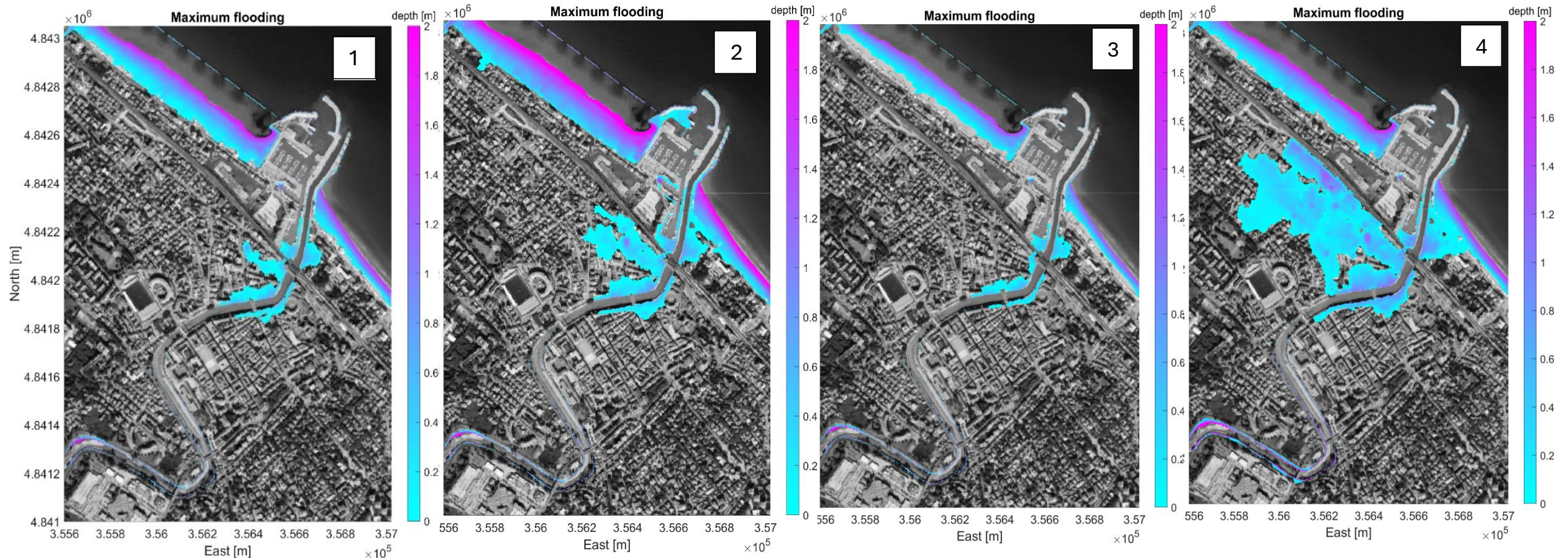
- La marea può risalire di oltre 1 Km verso monte



# Interazioni fiume-mare alla foce: storm surge («golfata»)

- Alcune semplici simulazioni numeriche (Delft3D) mostrano l'effetto relativo di vari forzanti.

Test N.	Q [m <sup>3</sup> /s]	Marea [m]	SLR [m]	Storm surge [m]	H <sub>s</sub> [m]
1	150	0.3	0.36	1	5
2	150	0.3	0.36	1.5	5
3	150	0	0.36	1	5
4	250	0.3	0.36	1	5





# Mitigare da monte o valle?



# Il cambiamento climatico: i nuovi regimi di portata

Corso d'acqua – sezione	Portate di picco (m³/s)		
	TR 50	TR 100	TR 200
Misa alla foce	502.12	540.86	590.81
Misa prima della confluenza con il Nevola	339.57	377.52	412.73
Nevola alla foce	263.83	280.79	305.66

Estratto da:

Assetto di progetto media e bassa valle del Fiume Misa  
*Regione Marche - Autorità di Bacino Regionale*, 2016

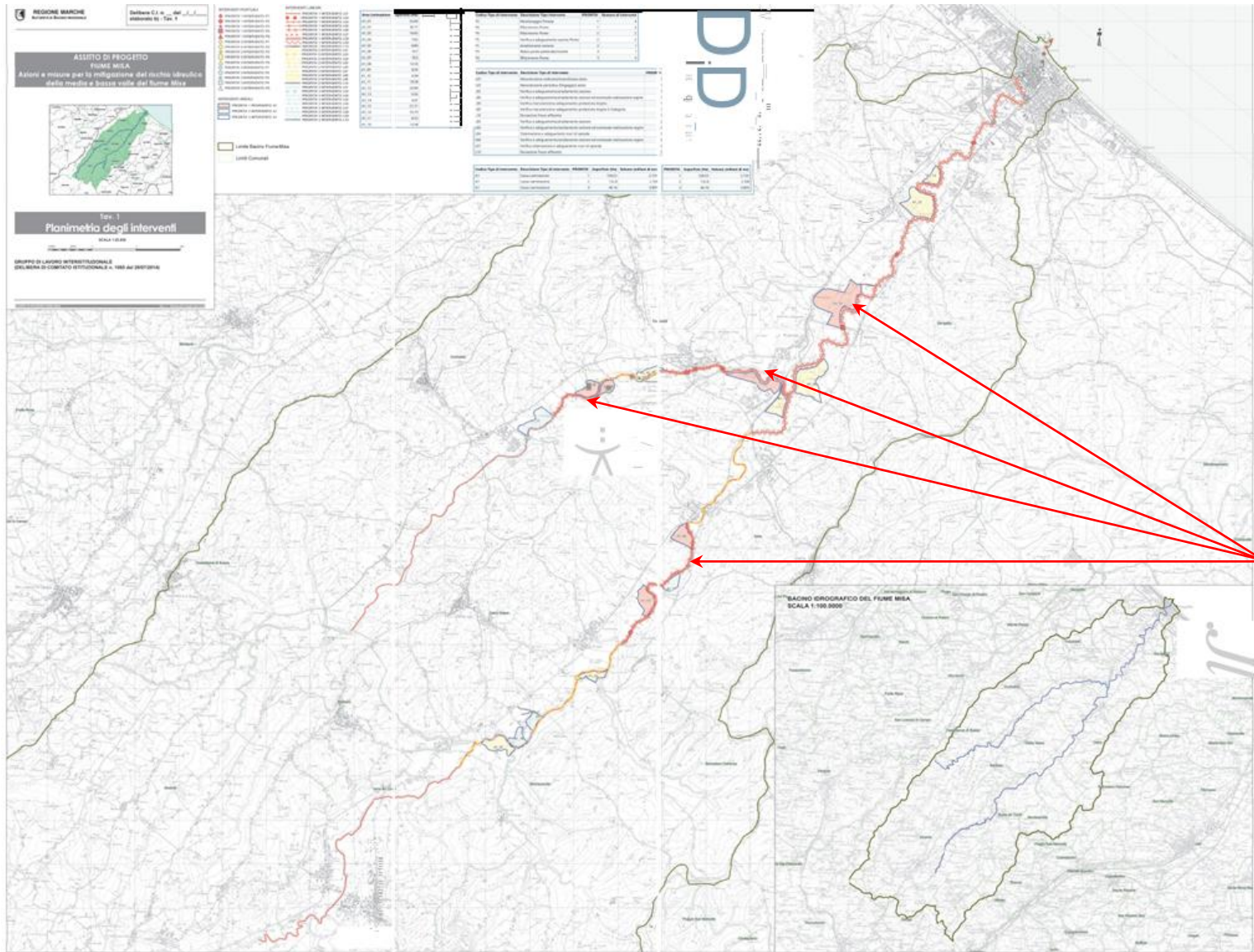
Corso d'acqua - sezione	Portate di picco (m³/s)							
	TR 5	TR 10	TR 20	TR 30	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500
Misa - Foce	349	451	570	639	724	826	951	1052
Misa - Bettolelle	323	425	532	593	667	774	878	971
Misa - Pianello d'Ostra	305	389	451	488	527	569	620	729
Misa - Serra de Conti	220	281	335	363	399	443	485	557
Nevola - Passo Ripe	160	209	258	293	324	365	402	490
Nevola - Corinaldo	147	196	244	279	310	353	389	476

Estratto da:

Valutazione dei massimi annuali di precipitazione e portata  
per il bacino del fiume Misa  
*Fondazione CIMA*, 2025

- Le **portate idriche** calcolate nel 2025 (funzione del tempo di ritorno) mostrano **incrementi dell'ordine del 30%-60%** rispetto a quelle calcolate nel 2016.

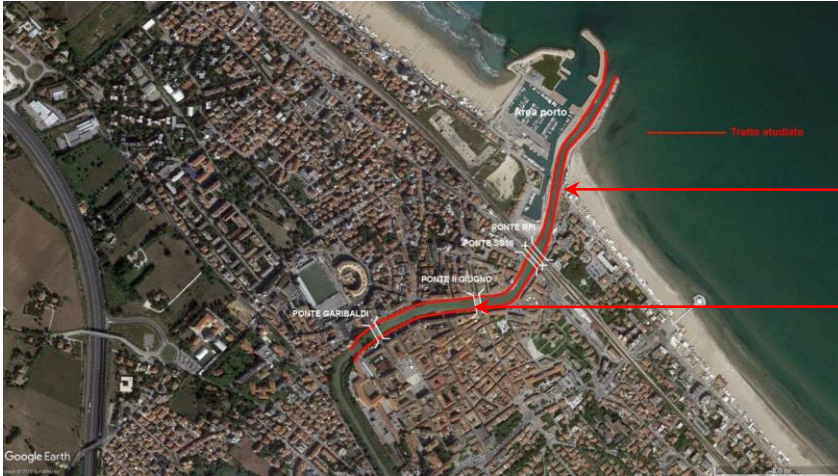
# L'Assetto di Progetto



- Dopo la disastrosa alluvione che nel 2014 causò 3 vittime e circa 200 milioni di euro di danni, la Regione Marche redasse la «**Struttura del Progetto del PAI e i documenti di progettazione del bacino idrografico della valle media e bassa della Misa (Assetto di Progetto)**»;
- Erano previsti interventi areali (14 bacini di laminazione), interventi lineari (dragaggio alla foce e manutenzione del letto del fiume erano prioritari) e interventi locali (media priorità per la ricostruzione dei ponti cittadini).



# Recenti implementazioni e progetti



Lo sfioratore avrà una lunghezza di circa 120m e come si dimostrerà nei paragrafi successivi, permette di sfiorare fino a 120mc/s.

L'opera non modificherà la geometria e il disegno del porto, e i fruitori del porto non percepiranno la presenza dello sfioratore, in quanto la banchina verrà sopraelevata e al di sotto di questa verrà realizzata l'opera di sfioro in calcestruzzo armato con soglia a quota +0.65m slm.

L'opera sarà dotata di un sistema grigliato, uno a maglia più grande verso il fiume e uno a maglie più piccola verso il porto, tale da impedire il trasporto di materiale e detriti trasportati dalla corrente verso l'area del porto. La stessa opera sarà ispezionabile e accessibile dalla banchine stessa.

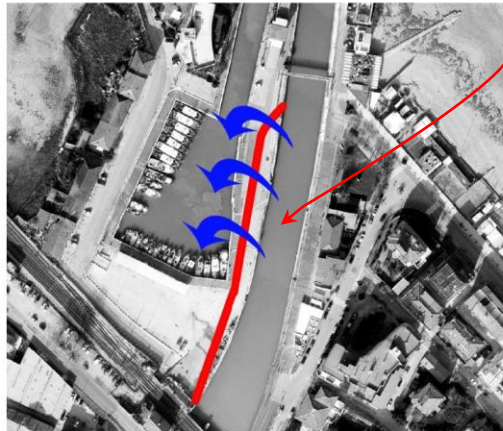


Figura 7.1 Sfioratore verso il porto

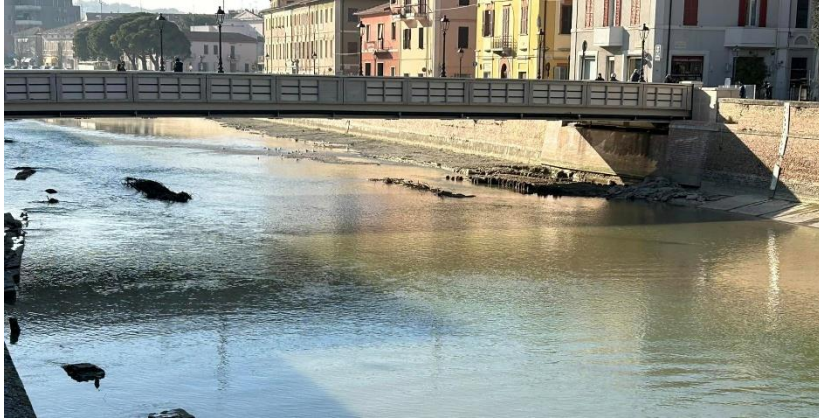
- La Regione Marche aveva identificato il "Consorzio di Bonifica delle Marche" (CBM) come ente attuatore;
- Nel periodo 2019-2020, il CBM ha presentato una serie di progetti coordinati che includevano: a) il **dragaggio** del letto del fiume nell'ultimo tratto del corso d'acqua, b) la **ricostruzione del Ponte Il Giugno** e c) uno **sfioratore alla foce** ottenuto aprendo un setto di 120 m di lunghezza e 80 cm di altezza tra il fiume e il molo del porto;
- Il progetto non prevedeva alcun intervento per tagliare il picco di piena a monte della città: **l'idea fondamentale era facilitare l'afflusso nel mare dell'intero scarico d'acqua proveniente da monte, facendolo transitare attraverso la città;**



- CBM aggiunse anche il progetto dell'estensione del molo di levante, ritenendo che **la barra della foce**, tipica di tutti i fiumi dell'Adriatico, **fosse di origine marina e aumentasse il rischio di inondazioni in città**. L'opera non era inclusa nell' «Assetto di Progetto».

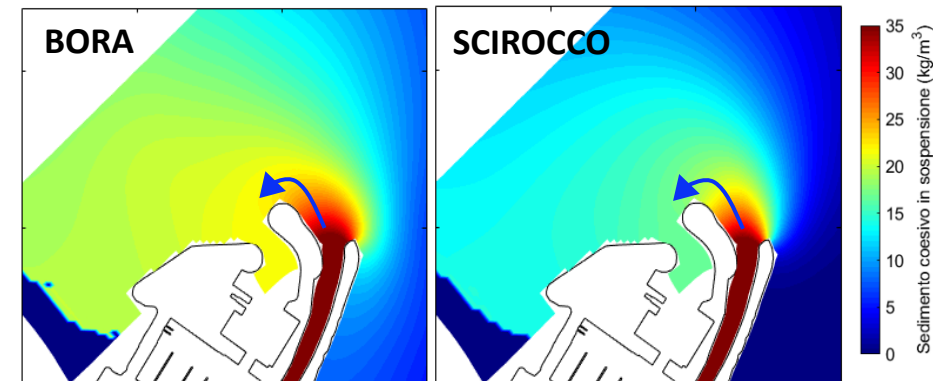
# Analisi di interventi e progetti

- Uno dei pochi interventi attuati finora è stata la ricostruzione del Ponte Il Giugno. Tuttavia, ciò ha mostrato importanti limitazioni, proprio durante l'edizione del 2022: **il ponte è stato costruito senza rispettare la luce libera di 1.5 m (franco idraulico).**



- Gli altri interventi avevano già sollevato **preoccupazioni** da parte dell'organo gestore del porto (ex Gestiport), potenzialmente influenzati dallo sfioratore (interrimento del porto) e dall'estensione del molo (smaltimento dei sedimenti in mare).
- Incaricata da Gestiport, UNIVPM ha studiato **l'effetto dell'estensione del molo dimostrando** che: a) la **barra di foce** è composta da **limo e ghiaia trasportati dal fiume** (l'estensione non ostacola la formazione della barra), b) questi sedimenti vengono **espulsi in mare a causa di eventi alluvionali** (l'estensione non migliora il deflusso), c) la **configurazione di progetto** avrebbe deviato gran parte dei sedimenti nell'avanporto.

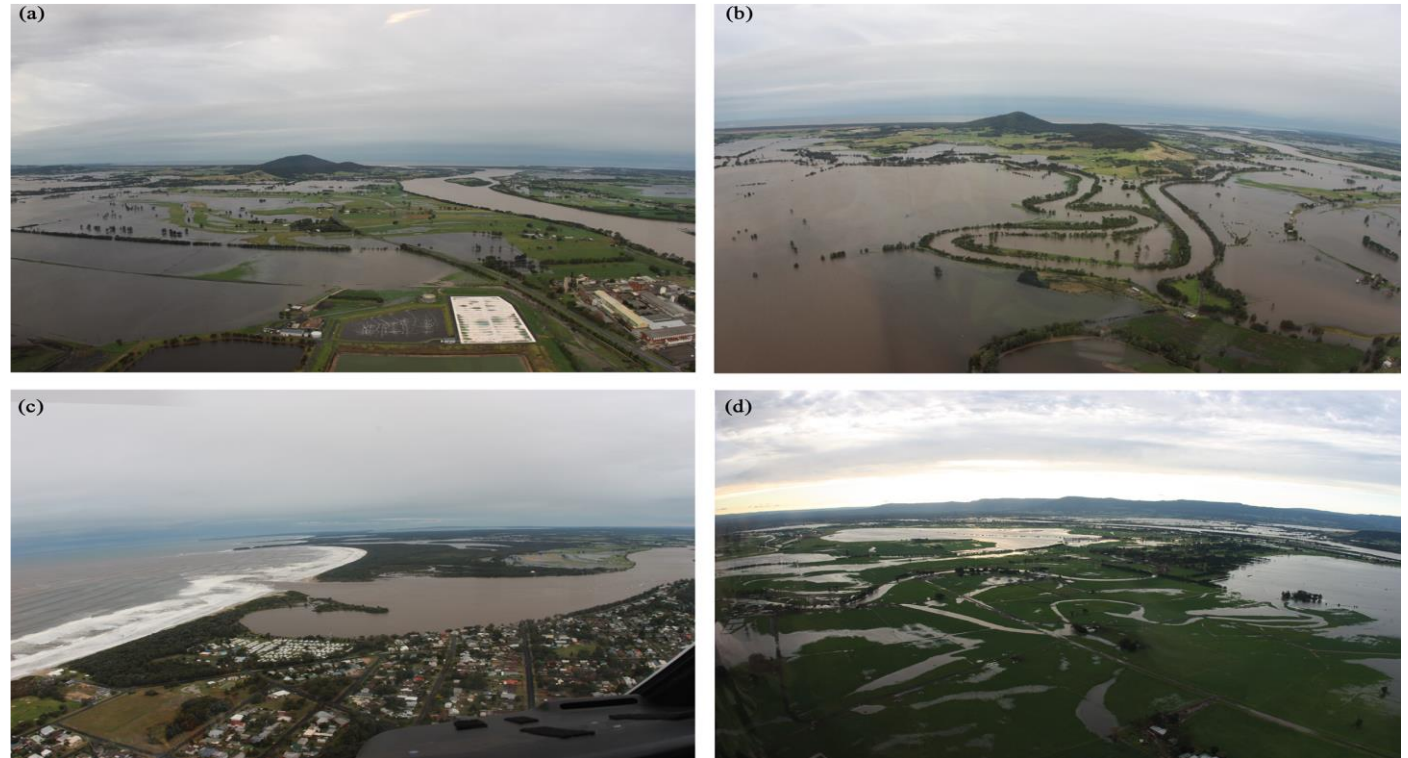
Codice	P1			P2			P3			P4			P5			P6		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Profondità da - a	0 0.5 m	0.5 1.0 m	1 2.0 m	0 0.5 m	0.5 1.0 m	1 2.0 m	0 0.5 m	0.5 1.0 m	1 2.0 m	0 0.5 m	0.5 1.0 m	1 2.0 m	0 0.5 m	0.5 1.0 m	1 2.0 m	0 0.5 m	0.5 1.0 m	1 2.0 m
% Ghiaia	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	69	40	26
% Sabbia	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	34	< 0.1	12	58	42	9
% Limo	55	51	48	51	49	56	62	54	55	49	58	38	34	48	65	0.7	13	2
% Argilla	45	49	52	49	51	44	38	46	45	17	42	18	8	10	26	0.4	3.4	0.9
% Frazione pelitica (<63 um)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	66	100	56	42	58	91	1	16	3





# Dubbi sulla strategia

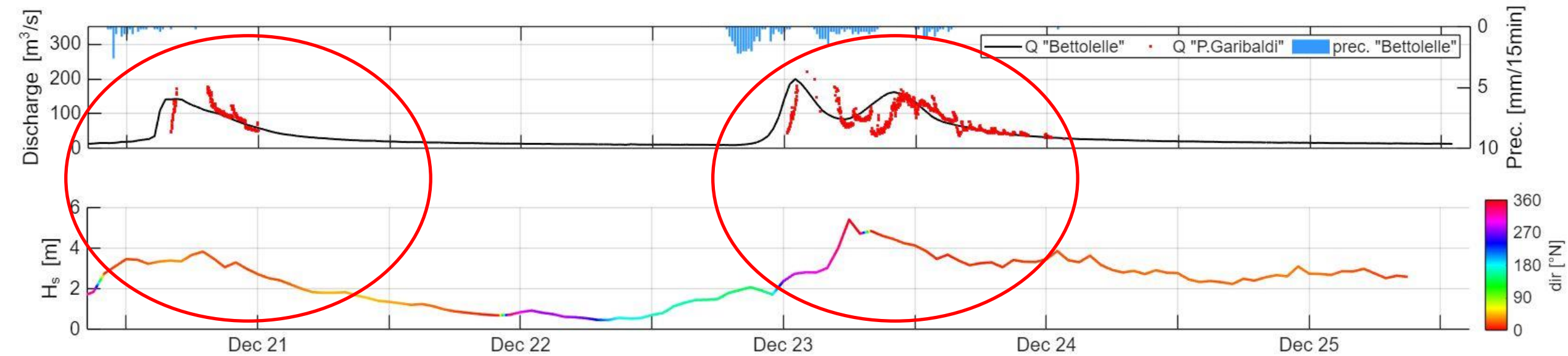
- Altri dubbi sull'efficacia dello smaltimento di grandi portate d'acqua in mare sorgono dall'osservazione che **un deflusso efficace richiede livelli idrici ridotti nel bacino a valle** (moli, mare, ecc.). Al contrario, possono verificarsi condizioni in cui **questi livelli sono significativamente più alti del livello medio del mare**, insieme a forti mareggiate, senza considerare la **potenziale alta marea ed il previsto innalzamento del livello del mare**.
- Negli ultimi anni, la comunità internazionale ha posto **il problema delle inondazioni delle città estuarine** proprio a causa della **concomitanza del picco di portata proveniente da monte e degli alti livelli del mare dovuti a tempeste e alta marea**.



Alluvione del fiume Shoalhaven (Australia) del 2016 causata da un blocco del flusso fluviale causato da mareggiata+alta marea.

# Dubbi sulla strategia

- Tale **concomitanza** si osserva frequentemente anche per il fiume Misa.

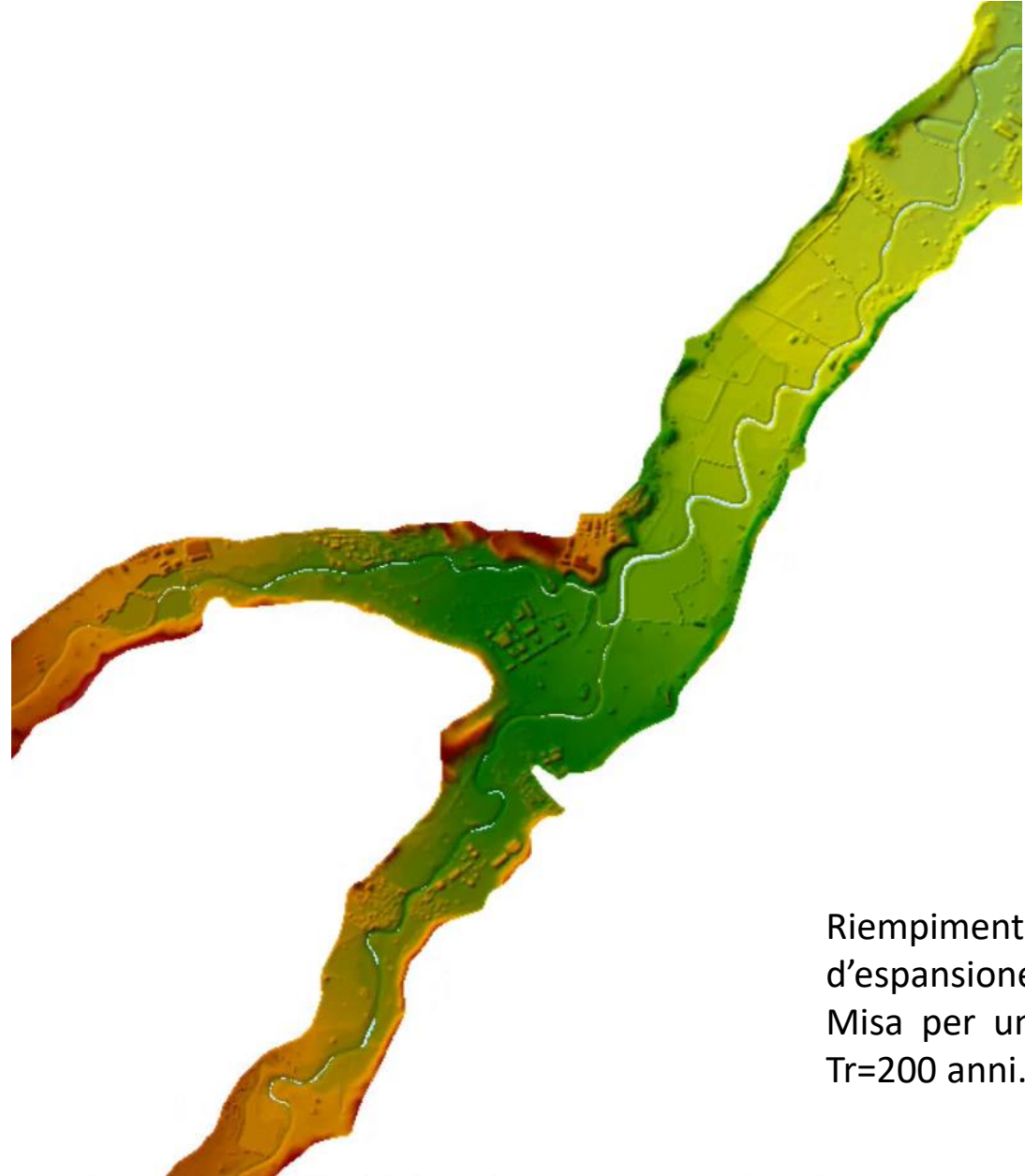




# Una revisione della strategia

Senigallia

- Quanto sopra ha **portato UNIVPM a proporre un cambiamento radicale nella strategia di mitigazione** che, assumendo gli elementi fondamentali dell' «**Assetto di Progetto**», **ridurrebbe i flussi in arrivo in città;**
- In particolare, si è proposto un sistema con un **numero minore di casse di espansione di maggiori dimensioni**, per rendere **più efficiente e sostenibile il sistema di casse d'espansione** previsto dal piano.



Riempimento delle casse d'espansione del fiume Misa per un'inondazione  $Tr=200$  anni.

# In corso d'opera



Tiranti idrici nell'abitato di Senigallia per l'evento del 15 settembre 2022. Sinistra = stato di fatto; Destra = stato di progetto.  
Fonte: Fondazione CIMA





# Conclusioni



- **L'evento** alluvionale del 15 settembre 2022 è stato di **natura eccezionale in relazione alle attuali statistiche**, ma diventerà sempre meno eccezionale in relazione al Cambiamento Climatico in atto;
- Le **città estuarine** saranno sempre più **soggette ad eventi alluvionali determinati dalla combinazione** di forzanti fluviali (portate di piena) e marini (sopraelevazioni del livello del mare);
- **Senigallia è particolarmente soggetta a questo tipo di alluvioni** (confermato dalla revisione degli eventi storici), anche in relazione alla struttura dell'abitato: al termine del **bacino di un fiume a carattere torrentizio** e soggetta ad importanti livelli di **storm surge**;
- E' quindi necessario **ridurre le portate di picco in arrivo da monte**, ricorrendo alla realizzazione di opportuni bacini di laminazione.



# Grazie dell'attenzione



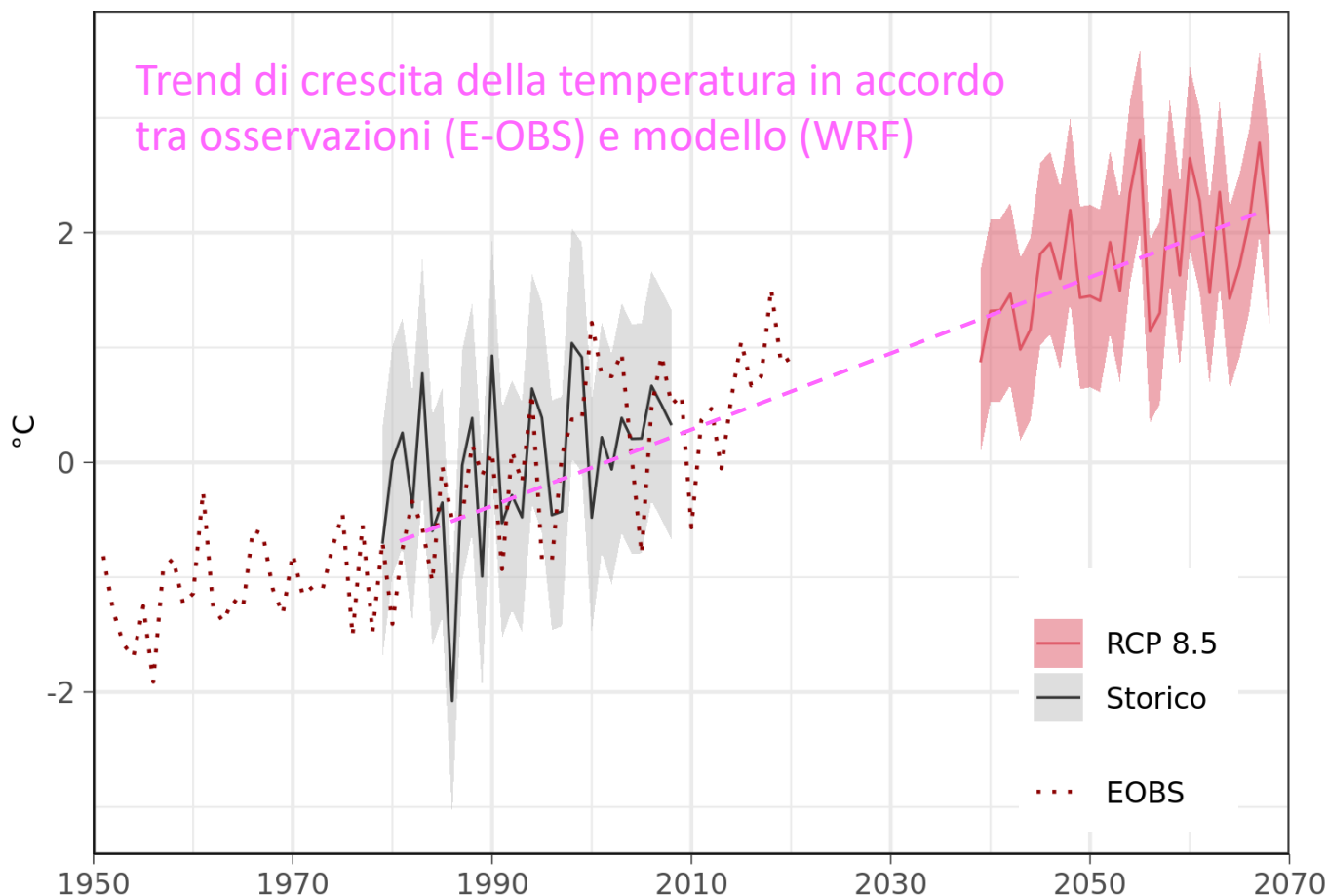
- PESARO: 9 m
- SENIGALLIA: 25 m
- CIVITANOVA MARCHE: 12 m
- SAN BENEDETTO DEL TRONTO: 30 m



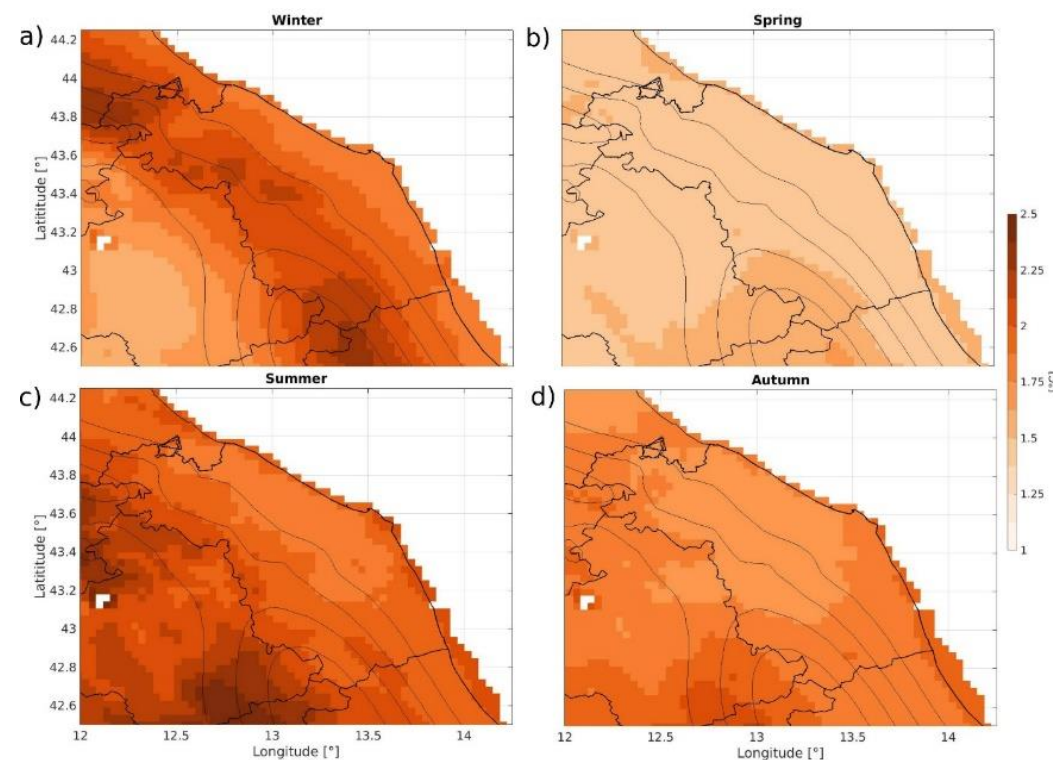
<https://scienceonthenet.shorthandstories.com/misa-la-scienza-di-cosa-successo/index.html>

# Scenario climatico futuro (WRF)

Anomalie di temperatura media annuale

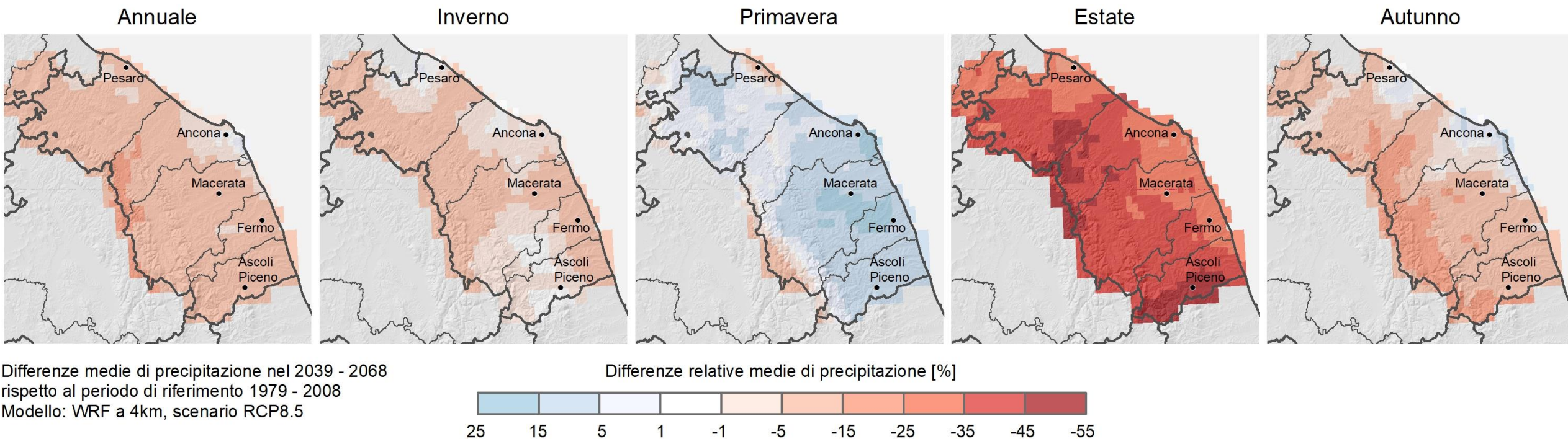


- $\sim +0.3$  °C al decennio nelle simulazioni WRF
- Trend simile per osservazioni e scenario
- **+1.8 °C** rispetto al passato **entro il 2070**
- Maggiore incremento delle temperature in estate e inverno, in particolare nelle aree più interne





# Scenario climatico futuro (WRF)



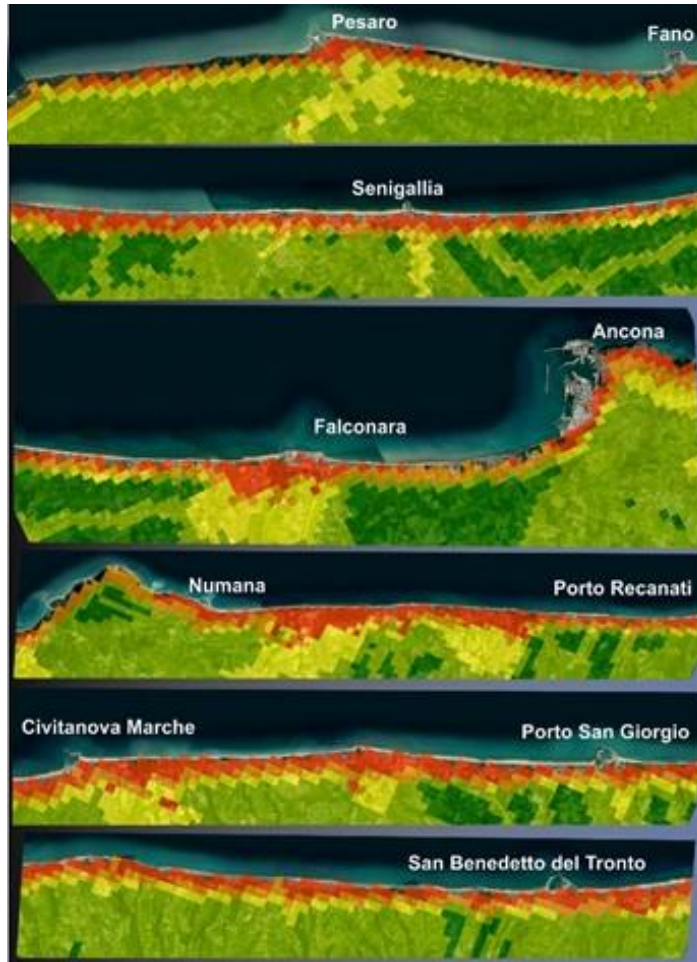
- Differenza relativa tra le medie trentennali future e storiche in ogni punto del grigliato
- **Riduzione del 9 %** della precipitazione annuale entro il 2070 rispetto allo storico (1979-2008)
- Tendenza alla diminuzione delle precipitazioni a scala annuale e stagionale, eccetto in primavera
- In autunno tendenza all'**aumento dei fenomeni intensi**



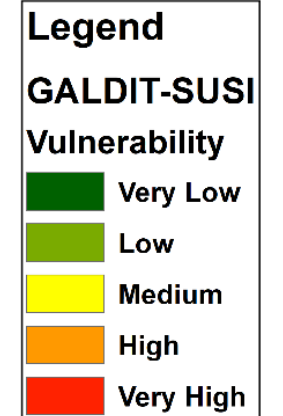
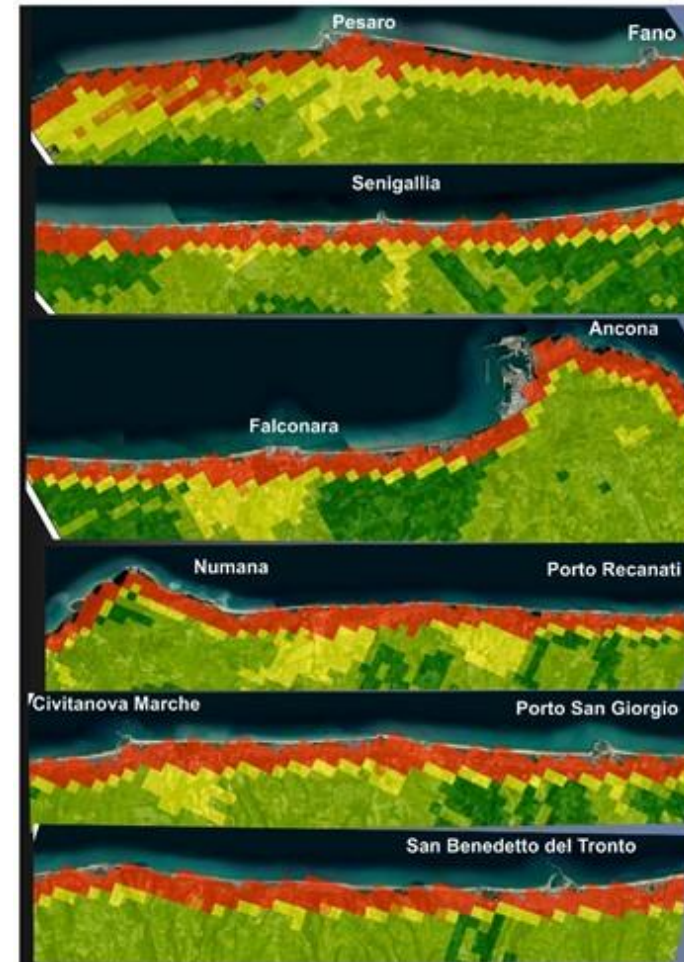
# Intrusione salina

A seguito dell'innalzamento del livello del mare, le aree altamente vulnerabili all'intrusione salina (aree rosse) aumenteranno.

SCENARIO ATTUALE



SCENARIO FUTURO TR100

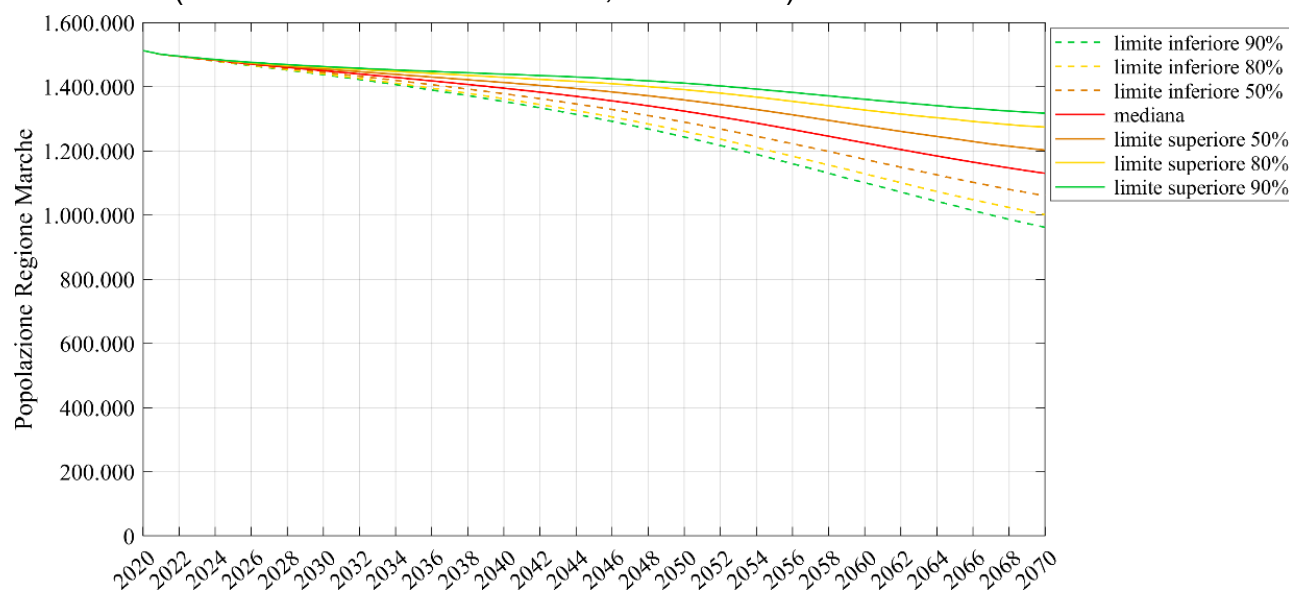


# Indicatori socio-economici

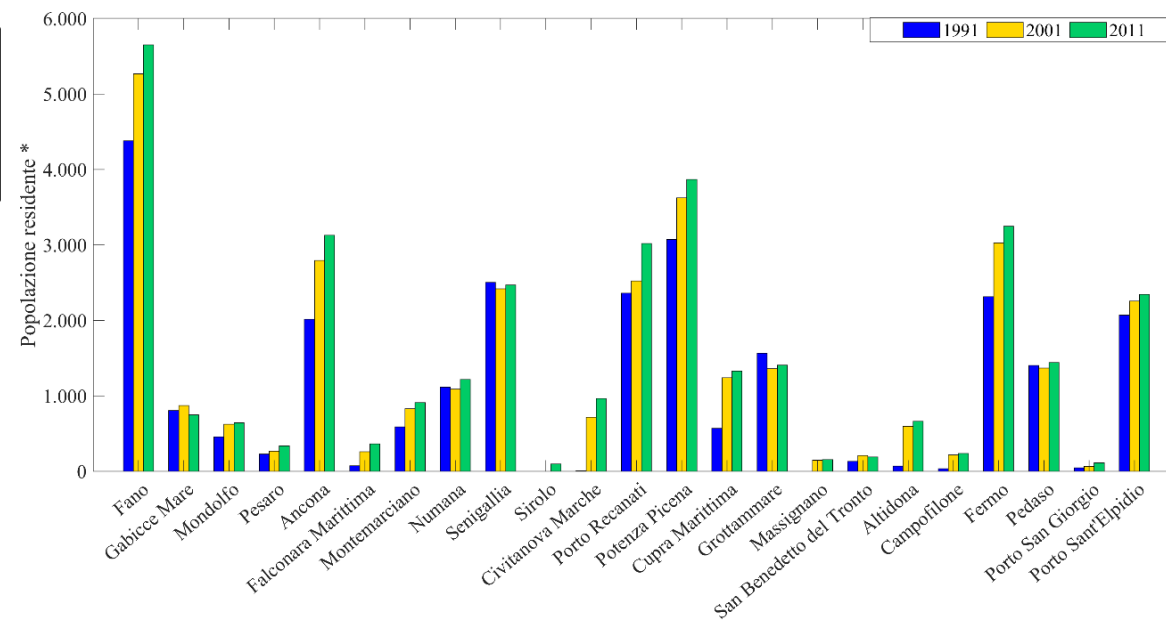
Dati ISTAT

È previsto un **calo della popolazione** regionale. Nelle Marche si prevede di passare da 1512672 persone nel 2020 a 1129967 persone nel 2070, corrispondente ad un decremento della popolazione pari al **25,30%**. Nonostante questo, la popolazione tende a **concentrarsi** sempre più nella fascia costiera.

Proiezioni demografiche fornite dall'ISTAT per il periodo 2020-2070: scenario mediano e livello di incertezza (intervalli di confidenza al 90%, 80% e 50%).



Popolazione residente nelle sezioni di censimento dei comuni costieri bagnate dal mare



# Indicatori socio-economici

- Presenza di **infrastrutture** che corrono **lungo la costa** (strade e ferrovia)
- **Eventi estremi**, sempre più frequenti, possono causare **allagamenti** delle **strade** e della ferrovia, portando a forti disagi per il trasporto di persone e merci.
- Sovrapposte le aree **inondabili derivanti dall'analisi speditiva** con le **strade**, disponibili su **OpenStreetMap®**, e le **ferrovie**, disponibili dal **grafo della viabilità della Regione Marche** (aggiornato al 2011). La lunghezza dei tratti di strade e ferrovie che intersecano le aree inondabili è stata rapportata alla lunghezza totale di tali infrastrutture insistenti sui comuni costieri.

